

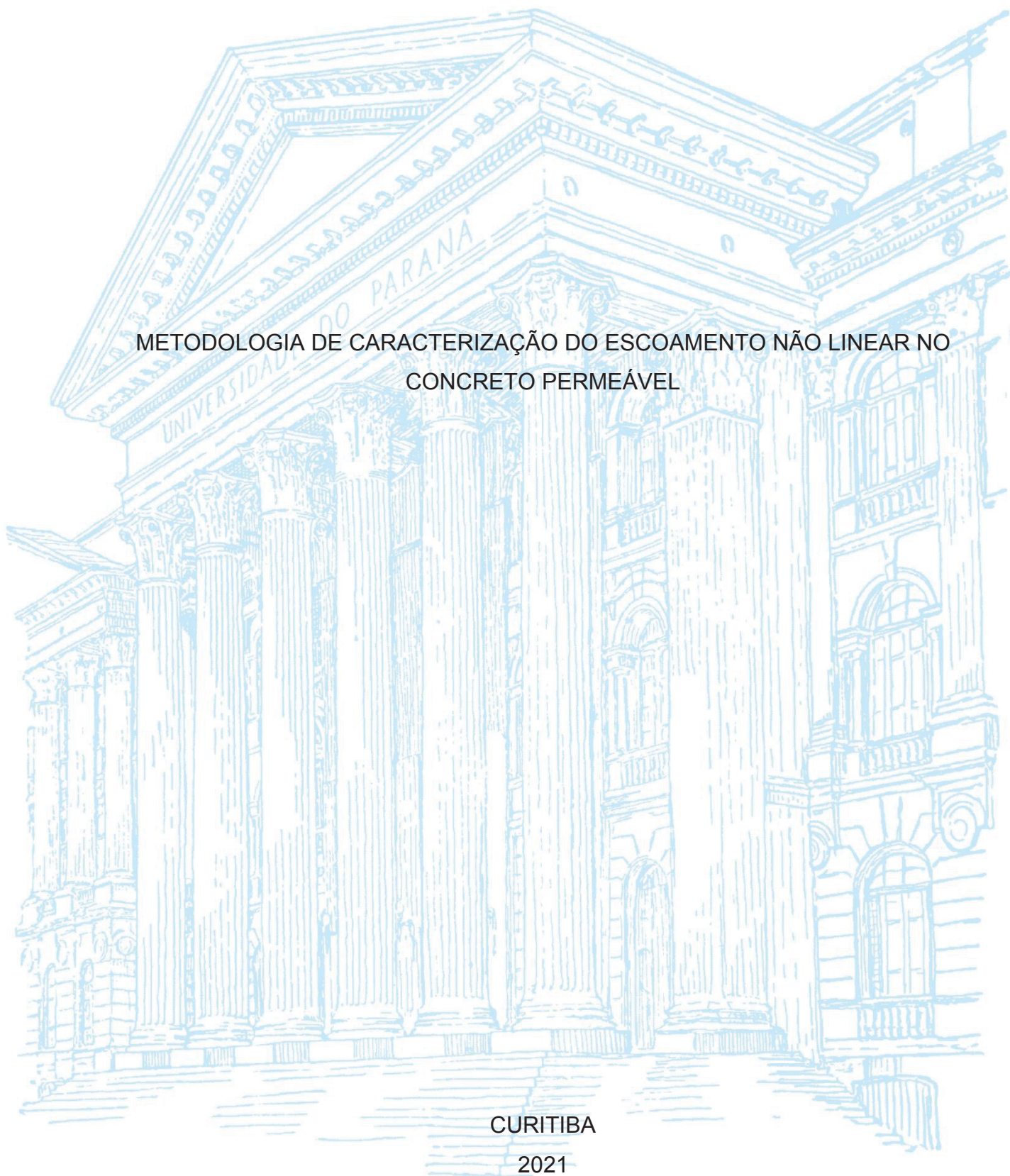
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SERGIO TUNIS MARTINS FILHO

METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NÃO LINEAR NO
CONCRETO PERMEÁVEL

CURITIBA

2021



SERGIO TUNIS MARTINS FILHO

METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NÃO LINEAR NO
CONCRETO PERMEÁVEL

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração em Materiais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Pieralisi.

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M386m Martins Filho, Sergio Tunis

Metodologia de caracterização do escoamento não linear no concreto permeável [recurso eletrônico] / Sergio Tunis Martins Filho. – Curitiba, 2021.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

Orientador: Ricardo Pieralisi.

1. Concreto. 2. Escoamento. 3. Vazões naturais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Pieralisi, Ricardo. III. Título.

CDD: 625.84

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **SERGIO TUNIS MARTINS FILHO** intitulada: **Metodologia de caracterização do escoamento não linear no concreto permeável**, sob orientação do Prof. Dr. RICARDO PIERALISI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 17 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

18/08/2021 16:19:06.0

RICARDO PIERALISI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/08/2021 17:14:35.0

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

Avaliador Externo (UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE)

Assinatura Eletrônica

19/08/2021 14:42:02.0

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

23/08/2021 10:52:17.0

FÁBIO CUNHA LOFRANO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: ppgecc@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 107557

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 107557

AGRADECIMENTOS

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de desenvolver um doutorado.

Aos professores do programa PPGECC por todo conhecimento adquirido na área de construção civil e materiais, com enorme contribuição para pesquisa e para práticas de docência.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTPFR), campus Apucarana, onde tenho o prazer de ser professor do curso de Engenharia Civil.

Aos colaboradores que de algum modo auxiliaram no desenvolvimento da tese e nas difíceis campanhas experimentais. Com destaque para meus alunos de Iniciação Científica da UTFPR, João Delgado, Juliano Franco e Eduardo Bosquesi. Aos servidores da limpeza, com eles o laboratório se tornou um ambiente propício ao trabalho, sempre muito organizado.

Ao professor Dr. Fábio Cunha Lofrano, por toda disposição, sugestões, e grande contribuição na área da mecânica dos fluidos. Exemplo de pessoa e de profissional.

Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho ou participaram da minha vida, e até pelas que não contribuíram.



Ao professor Dr. Ricardo Pieralisi, pelo intenso e incansável desejo de ajudar, realizando uma orientação de excelência. Tenho infinita gratidão por aceitar ser meu orientador e por todo conhecimento que compartilhou, e muito orgulho em ser seu primeiro orientado de doutorado. Um verdadeiro exemplo de companheirismo e humildade.



À família por todo apoio no desenvolvimento do doutorado e pelo amor incondicional em todos momentos da minha vida. Em específico, aos meus pais e irmão.

Nascer, morrer, renascer ainda e progredir sempre, tal é a lei.
(Allan Kardec)

RESUMO

O concreto permeável é um material poroso que apresenta propriedades essenciais para sua funcionalidade, como sua permeabilidade, contribuindo, principalmente, para a gestão de vazões no meio urbano. A avaliação do escoamento que nele se sucede é comum nos distintos campos do conhecimento. No entanto, não há consenso, e nem definições claras, do comportamento do fluido em seu meio poroso. Além disso, nota-se considerável influência dos materiais constituintes em suas propriedades finais e falta de metodologias objetivas para sua caracterização, principalmente através dos métodos não destrutivos. A partir disso, no presente estudo, objetiva-se investigar o comportamento hidráulico do concreto permeável, com foco para suas propriedades físicas. Para isso foram produzidos traços experimentais com diferentes relações Pasta/Agregado e relações água/cimento, com agregados basálticos de diferentes granulometrias e distintos processos de compactação. A caracterização hidráulica do concreto permeável foi realizada em um permeâmetro de carga constante. A partir dos resultados obtidos, verificou-se a não linearidade entre a velocidade do fluido e seu respectivo gradiente hidráulico, correspondendo a um comportamento sem fundamentos na, tão utilizada, Lei de Darcy. Com isso, utilizou-se do modelo proposto por Forchheimer, que permitiu avaliar o comportamento do fluido no meio poroso para todas as condições de vazão/gradiente, com boa aderência entre os resultados. Assim, foram definidos os parâmetros hidráulicos referentes ao fator de atrito e número de Reynolds, com verificações experimentais e análises numéricas. Por fim, através das condições de contorno estabelecidas, considerando parâmetros da entropia, o regime de escoamento do fluido no concreto permeável foi definido como não darciano, ou não linear de transição, ainda não atingindo um limite que se pode afirmar como turbulento. Além disso, foi atribuído significados físicos mais precisos para a interpretação de como a conformação do meio poroso, e sua conectividade, influenciam no escoamento do fluido. Desse modo, pode-se reforçar a hipótese de que materiais com a mesma porosidade, podem ter escoamentos distintos. O estudo se destaca pela robusta campanha experimental, permitindo identificar as principais propriedades do concreto permeável e fatores que as influenciam, com a constatação de metodologias avaliativas da consistência no estado fresco. Particularidades foram observadas em relação ao desempenho mecânico e ao processo de ruptura do material. Verificou-se o potencial de caracterização do concreto permeável através do Método de Ultrassom, o qual a onda ultrassônica se propaga por caminhos preferenciais, sendo que o meio poroso pode provocar alta atenuação, influenciando significativamente na definição da velocidade. Por fim, a análise numérica possibilitou a avaliação de parâmetros que quase nunca poderia ser obtido experimentalmente, aumentando a probabilidade de encontrar soluções em reduzido tempo, esforços e custos necessários.

Palavras-chave: Concreto permeável. Fluxo não Darciano. Lei de Forchheimer. Regime de escoamento. Simulação Computacional.

ABSTRACT

Pervious concrete is a porous material that has essential properties for its functionality, such as its permeability, contributing mainly to the management of flows in the urban environment. The evaluation of the flow that follows is common in the different fields of knowledge. However, there is no consensus, nor clear definitions, of the behavior of the fluid in its porous environment. In addition, there is a considerable influence of the constituent materials on their final properties and a lack of objective methodologies for their characterization, mainly through non-destructive methods. From this, in the present study, the objective is to investigate the hydraulic behavior of pervious concrete, focusing on its physical properties. For this, experimental features were produced with different Paste/Aggregate ratios and water/cement ratios, with basaltic aggregates of different granulometries and different compaction processes. The hydraulic characterization of the pervious concrete was carried out in a constant head permeameter. From the results obtained, it was verified the non-linearity between the fluid velocity and its respective hydraulic gradient, corresponding to an unfounded behavior in the, so used, Darcy's Law. Thus, it was used the model proposed by Forchheimer, which allowed to evaluate the behavior of the fluid in the porous medium for all flow/gradient conditions, with good adherence between the results. Thus, hydraulic parameters were defined for the friction factor and Reynolds number, with experimental and numerical validations. Finally, through the boundaries established considering entropy parameters, the flow regime of the fluid in the pervious concrete was defined as non-darcian, or non-linear, of transition, not yet reaching a limit that can be said to be turbulent. In addition, more precise physical meanings were attributed to the interpretation of how the conformation of the porous medium, and its connectivity, influences the flow of the fluid. In this way, one can reinforce the hypothesis that materials with the same porosity, can have different flows. The study stands out for its robust experimental campaign, allowing the identification of the main properties of pervious concrete and factors that influence them, with the verification of methodologies for assessing the consistency in the fresh state. Particularities were observed in relation to the mechanical performance and the process of rupture of the material. The pervious concrete characterization potential was verified through the Ultrasound Method, which the ultrasonic wave propagates through preferential ways, being that the porous medium can cause high attenuation, significantly influencing the definition of speed. Finally, numerical simulation enabled the evaluation of parameters that could almost never be obtained experimentally, increasing the likelihood of finding solutions in reduced time, effort and necessary costs.

Keywords: Pervious concrete. Non-Darcian flow. Forchheimer's Law. Flow regime. Computational Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COLORIDO UTILIZADO NA VILA OLÍMPICA EM PEQUIM (CHINA)	25
FIGURA 2 - ACABAMENTO SUPERFICIAL DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES P/AG	26
FIGURA 3 - CRESCIMENTO POPULACIONAL DO BRASIL RELACIONADO COM O TEMPO	28
FIGURA 4 - MAPA GLOBAL DAS ÁREAS DE SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS	29
FIGURA 5 - MAPA GLOBAL COM A IDENTIFICAÇÃO DAS INUNDAÇÕES REPORTADAS ENTRE 1985 e 2010	29
FIGURA 6 - CRONOLOGIA DE PUBLICAÇÕES DE PERIÓDICOS NA SCOPUS: <i>PERVIOUS CONCRETE</i>	32
FIGURA 7 - CALÇADA COM <i>PAVERS</i> DE CONCRETO PERMEÁVEL EM MARINGÁ/PR	34
FIGURA 8 - ORGANIZAÇÃO DA TESE	36
FIGURA 9 - FASES METODOLÓGICAS DO CAPÍTULO 3	37
FIGURA 10 - CONCRETO PERMEÁVEL EM ESTADO FRESCO COM BAIXA RELAÇÃO A/C (A), RELAÇÃO A/C IDEAL (B) e ALTA RELAÇÃO A/C (C)	43
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA ACI 522R-10	45
FIGURA 12 - TIPOS DE POROS NO CONCRETO PERMEÁVEL	50
FIGURA 13 - RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
FIGURA 14 - ESQUEMA DO PERMEÂMETRO (A) UTILIZADO PARA O ENSAIO DE CARGA VARIÁVEL (B) E DE CARGA CONSTANTE (C)	63
FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E POROSIDADE	67
FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: PERMEÂMENTRO DE CARGA CONSTANTE	68
FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE A ALTURA DE CARGA E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	69
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO DA LEI DE DARCY E DE FORCHHEIMER	73

FIGURA 19 - DIAGRAMA DE MOODY	75
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE FATOR DE RESISTÊNCIA PARA MEIOS POROSOS	77
FIGURA 21 - DIAGRAMA DE LOFRANO <i>ET AL.</i> (2020): DELIMITAÇÕES DOS REGIMES DE ESCOAMENTO EM MEIO POROSOS.....	80
FIGURA 22 - RELAÇÃO ENTRE A/C E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	87
FIGURA 23 - RELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E (A) COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E (B) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO.....	90
FIGURA 24 - ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	93
FIGURA 25 - ETAPAS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	94
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS CONJUNTOS GRANULARES	95
FIGURA 27 - ASPECTO SUPERFICIAL DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS.....	96
FIGURA 28 - CLASSIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS SEGUNDO O DIAGRAMA DE ZINGG (1935).....	98
FIGURA 29 - PROCEDIMENTO DE MISTURA MECÂNICA EM BALDE PADRONIZADO (ABNT NBR 45:2006) E MISTURADOR ACOPLADO EM FURADEIRA	100
FIGURA 30 - MÉTODO NGUYEN <i>ET AL.</i> (2014) ADAPTADO: (A) CONCRETO ESTADO FRESCO SOBRE A MALHA DA PENEIRA; (B) PASTA DE CIMENTO EM EXCESSO	101
FIGURA 31 - PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	103
FIGURA 32 - ENSAIO DE POROSIDADE EFETIVA: (A; B) CP CONFINADO COM PAPEL FILME E FITA ADESIVA (C) LANÇAMENTO DE ÁGUA NO CP CONFINADO EM MOLDE METÁLICO	109
FIGURA 33 - PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE	110
FIGURA 34 - CAPEAMENTO COM GESSO NO CP DE CONCRETO PERMEÁVEL	112
FIGURA 35 - ENSAIO PELO MÉTODO DE ULTRASSOM.....	113
FIGURA 36 - RELAÇÃO A/C LIMITE PARA DIFERENTES RELAÇÕES P/AG EM DUAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	115

FIGURA 37 - RELAÇÃO A/C E DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (A) E NO ESTADO ENDURECIDO (B).....	120
FIGURA 38 - RELAÇÃO A/C E POROSIDADE TOTAL (A) E POROSIDADE EFETIVA (B)	121
FIGURA 39 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RELAÇÃO A/C	122
FIGURA 40 - VELOCIDADE MÉDIA DO CONCRETO PERMEÁVEL EM DIFERENTES GRADIENTES HIDRÁULICOS (A) E RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E ALTURA DE CARGA COM ABORDAGEM DARCIANA: CP55HU(30).....	123
FIGURA 41 - RELAÇÃO P/AG E DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (A) E DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO (B)	126
FIGURA 42 - RELAÇÃO P/AG E POROSIDADE TOTAL (A) E POROSIDADE EFETIVA (B)	127
FIGURA 43 - DADOS DE POROSIDADE TOTAL (A), EFETIVA (B), CONECTIVIDADE DOS POROS (C) E CORRELAÇÃO ENTRE POROSIDADE TOTAL E EFETIVA (D)	128
FIGURA 44 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RELAÇÃO P/AG.....	130
FIGURA 45 - FISSURAS NO CONCRETO PERMEÁVEL: RELAÇÃO P/AG DE 0,35 (A) E 0,25(B)	131
FIGURA 46 - VELOCIDADE MÉDIA DO CONCRETO PERMEÁVEL EM DIFERENTES GRADIENTES HIDRÁULICOS (A) E RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E ALTURA DE CARGA COM ABORDAGEM DARCIANA: CP45HU(30).....	132
FIGURA 47 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RELAÇÃO A/C	134
FIGURA 48 - RELAÇÃO ENTRE VPU COM POROSIDADE TOTAL (A) E DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO (B) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (C)	136
FIGURA 49 - AJUSTES DE ACORDO COM A LEI DE DARCY (A) E A EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER (B) PARA ESCOAMENTO EM CONCRETO PERMEÁVEL	139
FIGURA 50 - DADOS HIDRÁULICOS DO CONCRETO PERMEÁVEL DO TRAÇO CP1(QIN): (A) GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE MÉDIA (B) FATOR DE ATRITO E NÚMERO DE REYNOLDS	142
FIGURA 51 - REGIME DE ESCOAMENTO: DADOS DE QIN <i>et al.</i> (2015)	144

FIGURA 52 - GRADIENTE HIDRAULICO E VELOCIDADE MÉDIA: DELIMITAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO DO TRAÇO CP1(QIN).....	146
FIGURA 53 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE MÉDIA DO FLUIDO: EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER.....	148
FIGURA 54 - RESULTADOS MÉDIOS/DESVIOS PADRÃO DOS PARÂMETROS K , d E d/K	150
FIGURA 55 - REGIME DE ESCOAMENTO NO CONCRETO PERMEÁVEL: DADOS EXPERIMENTAIS	152
FIGURA 56 - RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DE PERMEABILIDADE E POROSIDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	154
FIGURA 57 - RELAÇÕES ENTRE k/d E POROSIDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	156
FIGURA 58 - DIAGRAMA DO REGIME DE ESCOAMENTO NO CONCRETO PERMEÁVEL:GENERALIDADE DOS TRAÇOS EXPERIMENTAIS	163
FIGURA 59 - RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DE PERMEABILIDADE E POROSIDADE TOTAL DO CONCRETO PERMEÁVEL	164
FIGURA 60 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA: (A) MODELO GEOMÉTRICO DO CONCRETO PERMEÁVEL (B) CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	167
FIGURA 61 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE MÉDIA (A) E FATOR DE ATRITO E NÚMERO DE REYNOLDS (B): MODELO GEOMÉTRICO	168
FIGURA 62 - REGIME DE ESCOAMENTO DO MODELO FÍSICO	169
FIGURA 63 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - SEÇÃO LONGITUDINAL DO MODELO FÍSICO COM LINHAS DE FLUXO E SUA RESPECTIVA LEGENDA: (A) PRESSÃO DE 489,30 Pa, (B) PRESSÃO DE 2.935,82 Pa, (C) PRESSÃO DE 4.893,03 Pa, (D) PRESSÃO 14.679,10 Pa	171
FIGURA 64 - CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENE DE PERMEABILIDADE E ALTURA DE CARGA: ABORDAGEM DARCIANA.....	193
FIGURA 65 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A), NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRIO (B): QIN (1).....	196
FIGURA 66 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A) E NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRIO (B): QIN (2).....	198
FIGURA 67 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A) E NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRITO (B): QIN (3)	200

FIGURA 68 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A) E NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRIO (B): $QIN(4)$	201
FIGURA 69 - ENSAIO DE RUPTURA À TRAÇÃO.....	222
FIGURA 70 - MASSA UNITÁRIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS SUBMETIDAS A DIFERENTES PROCESSOS DE COMPACTAÇÕES.....	224
FIGURA 71 - POROSIDADE TOTAL E DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (A) E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO PROPOSTA (B)	226
FIGURA 72 - DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO E FRESCO	227
FIGURA 73 - POROSIDADE TOTAL E EFETIVA.....	228
FIGURA 74 - DIFERENÇA ENTRE POROSIDADE TOTAL E EFETIVA: MÉTODO DE COMPACTAÇÃO POR HASTE E VIBRAÇÃO.....	230
FIGURA 75 - ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DO CONCRETO PERMEÁVEL: COMPACTAÇÃO POR VIBRAÇÃO	231
FIGURA 76 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE (A) E VALIDAÇÃO DA RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL E ANALÍTICA (B)	233
FIGURA 77 - RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E POROSIDADE TOTAL (A) E RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO (B).....	234
FIGURA 78 - SEÇÃO FRATURADA PELO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO: (A) CP36HC(30) E (B) CP65HC(30)	235

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÕES DO CONCRETO PERMEÁVEL	41
TABELA 2 - PROPORÇÕES DE MATERIAIS NO CONCRETO PERMEÁVEL	43
TABELA 3 - EQUAÇÕES PARA CORRELACIONAR A POROSIDADE COM O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: ESTADO DA ARTE.....	70
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DO AGREGADO DOS CONJUNTOS GRANULARES	95
TABELA 5 - DIMENSÕES, ÍNDICE DE FORMA E ESFERICIDADE DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS.....	97
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS: ESTADO SOLTO	99
TABELA 7 - DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PELO MÉTODO NGUYEN <i>ET AL.</i> (2014) ADAPTADO	101
TABELA 8 - TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES A/C.....	102
TABELA 9 - QUANTITATIVOS DOS CORPOS DE PROVA: FASE II.....	104
TABELA 10 - TRAÇO DO CONCRETO PERMEÁVEL: VARIAÇÕES DA RELAÇÃO P/AG	105
TABELA 11 - QUANTITATIVOS DOS CORPOS DE PROVA: FASE III.....	106
TABELA 12 - QUANTITATIVO DOS CORPOS DE PROVA: FASE IV.....	107
TABELA 13 - TRAÇOS TESTES DE CONSISTÊNCIA REFERÊNTES AO TRAÇO 1	114
TABELA 14 - DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PELO MÉTODO NGUYEN <i>ET AL.</i> (2014) ADAPTADO.....	115
TABELA 15 - ESPESSURA DE PASTA DOS TRAÇOS T1 A T10.....	117
TABELA 16 - MÉTODO STEPWISE-ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO A/C E P/AG	119
TABELA 17 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES A/C.....	120
TABELA 18 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES P/AG	125
TABELA 19 - VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO	134

TABELA 20 - MÉTODO STEPWISE-ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO VPU E P/AG	134
TABELA 21 - MÉTODO STEPWISE-ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO A/C E P/AG	137
TABELA 22 - DADOS HIDRÁULICOS: TRAÇO QIN <i>et al.</i> 2015.....	143
TABELA 23 - DADOS HIDRÁULICOS: TRAÇOS EXPERIMENTAIS	149
TABELA 24 - DADOS HIDRÁULICOS PARA MEIOS POROSOS: CP55HU(30) E CP65HU(30).....	157
TABELA 25 - CARACTERISTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL: CONSUMO DE MATERIAIS DOS TRAÇOS	161
TABELA 26 - POROSIDADE E PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO	162
TABELA 27 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO NO MODELO GEOMÉTRICO.....	167
TABELA 28 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA MEIOS POROSOS: NÚMÉRICO E EXPERIMENTAL.....	172
TABELA 29 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM DIFERENTES CARGAS HIDRÁULICAS	192
TABELA 30 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (1).....	195
TABELA 31 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (2).....	197
TABELA 32 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (3).....	199
TABELA 33 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (4).....	200
TABELA 34 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP35HU(30)	203
TABELA 35 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP35HU(30).....	203
TABELA 36 - DADOS DO ESCOAMENTO E FORCHHEIMER: TRAÇO CP45HU(30)	204
TABELA 37- PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP45HU(30).....	205
TABELA 38 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP55HU(30)	206
TABELA 39 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP55HU(30).....	207

TABELA 40 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP65HU(30)	208
TABELA 41- PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO	
CP65HU(30).....	209
TABELA 42 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP55HU(26)	210
TABELA 43 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO	
CP55HU(26).....	210
TABELA 44 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP55HU(34)	211
TABELA 45 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO	
CP55HU(34).....	211
TABELA 46 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP42HC(30)	212
TABELA 47- DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP42HC(30).	213
TABELA 48 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP36HC(30)	214
TABELA 49 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP36HC(30)	215
TABELA 50 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP42VC(30)	216
TABELA 51 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO	
CP42VC(30).....	216
TABELA 52 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER:	
TRAÇO CP36VC(30)	217
TABELA 53 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO	
CP36VC(30).....	217
TABELA 54 - COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS	218
TABELA 55 - TRAÇOS DO CONCRETO PERMEÁVEL E CONSUMO DOS	
MATERIAIS	220
TABELA 56 - QUANTITATIVOS DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO	
PERMEÁVEL	221
TABELA 57 - MASSAS UNITÁRIAS DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO COM	
HASTE	223

TABELA 58 - MASSAS UNITÁRIAS UTILIZANDO O PROCESSO DE COMPACTAÇÃO COM MESA VIBRATÓRIA DURANTE 5 SEGUNDOS.....	223
TABELA 59 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL: QUADRO RESUMO	225
TABELA 60 - MÉTODO STEPWISE: POROSIDADE TOTAL	226
TABELA 61 - DIFERENÇA MÉDIA DA POROSIDADE TOTAL E EFETIVA: TIPOS DE COMPACTAÇÃO	231
TABELA 62 - EQUAÇÃO DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO...	232

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	-Agência Nacional das Águas
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
A/C	-Água/cimento
CONAMA	-Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA	-Companhia Agropecuária de Fomento Econômico
CP	-Corpo de prova
CP II-Z	-Cimento Portland composto com material pozolânico
EPA	-Agência de Proteção ao Meio Ambiente (Estado Unidos)
HAP	-Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
IBGE	-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LEED	-Leadership in Energy and Environmental Design
NRMCA	-National Ready Mixed Concrete Association
PCA	-Portland Cement Association
PCP	-Pervious concrete pavements
PIB	-Produto interno bruto
RCC	-Resíduo da construção civil
P/AG	-Relação pasta/agregado
UTFPR	-Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

a	-Coeficiente linear de Forchheimer
a'	-Coeficiente de ajuste
A	-Área da seção transversal
b	-Coeficiente quadrático de Forchheimer
c	-Constante do meio poroso
d	-Comprimento característico do meio poroso
D	-Diâmetro do corpo de prova
D_{10}	-Diâmetro da malha de peneira que passa 10% dos agregados
f	-Fator de atrito
$f_{\sqrt{k}}$	-Fator de resistência do fluido no meio poroso
g	-Aceleração gravitacional
G	-Consumo de agregados
h	-Distância entre a parte inferior do CP e o nível de água
h_i	-Distância entre a parte superior do CP e o nível de água inicial
h_f	-Distância entre a parte superior do CP e o nível de água final
i	-Gradiente hidráulico
K	-Coeficiente de permeabilidade
k	-Permeabilidade intrínseca
K_{eq}	-Coeficiente de permeabilidade equivalente de Darcy
L	-Unidade de comprimento
L_S	-Altura da amostra
M_W	-Massa de água adicionada
P_e	-Porosidade efetiva
P_t	-Porosidade total
$P_{t,f}$	-Porosidade do concreto no estado fresco
ρ_f	-Densidade no estado fresco
ρ_t	-Densidade teórica
ρ_W	-Densidade da água
ρ	-Massa específica do fluido
$\rho_{\sqrt{k}}$	-Massa específica da água

q	-Velocidade média do escoamento
Q	-Vazão do fluido
r_m	-Raio médio
Re	-Número de Reynolds
$Re_{\sqrt{k}}$	-Número de Reynolds do fluido no meio poroso
T	-Símbolo dimensional de tempo
μ	-Viscosidade dinâmica do fluido
V_a	-Volume do conjunto de 200 agregados
$V_{a,u}$	-Volume médio de um agregado
V_{Ag}	-Volume sólido dos agregados
V_{EP}	-Excesso de pasta
V_{PC}	-Volume de pasta compactada
V_v	-Volume de vazios
$VP U_{ag}$	-Velocidade do pulso ultrassônico no agregado
$VP U_{ar}$	-Velocidade do pulso ultrassônico na argamassa
$VP U_C$	-Velocidade do pulso ultrassônico no concreto
W_2	-Massa hidrostática
WL_i	-Nível inicial de água
WL_f	-Nível final da água
W	-Símbolo dimensional de massa
σ_c	-Resistência à compressão
σ_t	-Resistência à tração
Δh	-Carga hidráulica
Δt	-Intervalo de tempo
ϕ_P^2	-Diâmetro interno do tubo
ϕ_S	-Diâmetro da amostra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	24
1.2	OBJETIVOS	26
1.2.1	OBJETIVO GERAL	26
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.3	JUSTIFICATIVA.....	27
1.3.1	ASPECTO SOCIOECONÔMICO E AMBIENTAL	27
1.3.2	ASPECTO TÉCNICO	30
1.4	ORGANIZAÇÃO DA TESE	35
2	ESTADO DA ARTE.....	40
2.1	MEIOS POROSOS	40
2.2	COMPOSIÇÕES DO CONCRETO PERMEÁVEL	41
2.3	MÉTODOS DE DOSAGEM	42
2.3.1	Manual do PCP (Tennis, Lemin e Akers, 2004).....	42
2.3.2	ACI 522R-10 (2010).....	44
2.3.3	Zheng <i>et al.</i> (2012)	45
2.3.4	Nguyen <i>et al.</i> (2014)	46
2.4	PREPARO E PRODUÇÃO	47
2.4.1	Procedimento de mistura	47
2.4.2	Adensamento e cura em laboratório	48
2.5	PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	49
2.5.1	Porosidade	49
2.5.1.1	Análise das definições de porosidade	52
2.5.2	Resistência mecânica.....	54
2.5.3	Velocidade de onda ultrassônica	55
2.6	PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL	61
2.6.1	Escoamento no concreto permeável: abordagem darciana.....	61
2.6.1.1	Ensaio de permeabilidade em laboratório	63
2.6.1.2	Ensaio de permeabilidade <i>in loco</i>	65
2.6.1.3	Relação entre coeficiente de permeabilidade e porosidade	66
2.6.2	Escoamento em meios porosos: abordagem não darciana.....	71
2.6.2.1	Regimes de escoamento	74

2.6.2.2	Escoamento não darciano em concreto permeável.....	81
2.7	FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES.....	84
2.7.1	Agregados	84
2.7.2	Relação água/cimento (a/c).....	86
2.7.3	Volume de pasta.....	88
2.7.4	Métodos de compactação.....	89
2.8	DISCUSSÃO	91
3	MATERIAIS E MÉTODOS	93
3.1	MATERIAIS	94
3.1.1	Agregados graúdos	94
3.1.2	Cimento Portland	99
3.2	MÉTODOS	99
3.2.1	Fase I: Determinação da consistência da pasta de cimento	99
3.2.2	Fase II: Influência da consistência da pasta de cimento	102
3.2.3	Fase III: Influência do volume de pasta de cimento	105
3.2.4	Fase IV: Velocidade de propagação da onda ultrassônica	106
3.3	ENSAIOS.....	107
3.3.1	Densidade e porosidade no estado fresco	107
3.3.2	Densidade e porosidade no estado endurecido	108
3.3.3	Propriedades hidráulicas	109
3.3.4	Resistência à compressão.....	112
3.3.5	VPU	112
4	RESULTADOS E ANÁLISE	114
4.1	FASE I	114
4.2	FASE II	119
4.3	FASE III	124
4.4	FASE IV	133
5	PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL	139
5.1	CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO EM MEIO POROSOS.....	139
5.2	ANÁLISE DOS DADOS DE QIN <i>et al.</i> (2015).....	142
5.3	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: DADOS EXPERIMENTAIS.....	147
5.4	MUDANÇA DE FILOSOFIA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS.....	159
5.5	CAMPANHAS EXPERIMENTAIS COMPLEMENTARES	160
5.5.1	Materiais e métodos	161

5.5.2	Resultados.....	161
5.5.3	Regime de escoamento do concreto permeável	162
5.5.4	Correlação dos parâmetros hidráulicos e porosidade total.....	164
6	ANÁLISE NUMÉRICA.....	166
6.1	MODELO GEOMÉTRICO E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	166
6.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM DIFERENTES CARGAS HIDRÁULICAS ...	167
6.2.1	Regime do escoamento do concreto permeável	169
6.2.2	Linhas de fluxo do escoamento: Modelo físico	170
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	173
7.1	CONCLUSÃO GERAL.....	173
7.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	173
7.3	PERSPECTIVAS FUTURAS	175
	REFERÊNCIAS.....	176
	APÊNDICE 1 – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: ABORDAGEM	
	DARCIANA	192
	APÊNDICE 2 – DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO (QIN ET AL.	
	2015):	195
	ABORDAGEM NÃO DARCIANA.....	195
	APÊNDICE 3 – DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO	
	(EXPERIMENTAL): ABORDAGEM NÃO DARCIANA	202
	APÊNDICE 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL:	
	ANÁLISE GERAL DOS TRAÇOS.....	218

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Segundo Francis (1965) o “concreto sem finos”, denominado atualmente de concreto permeável, foi utilizado pela primeira vez, em 1852, na construção de duas casas no Reino Unido (UK). Sua composição consistia apenas em agregado graúdo e pasta de cimento. A Segunda Guerra Mundial, entre os anos de 1939 a 1945, deixou quase toda a Europa com grandes necessidades habitacionais, o que encorajou o desenvolvimento de novos métodos na construção civil, voltando a utilização do “concreto sem finos” em construções de paredes autoportantes (MALHOTRA, 1969). Destaca-se que a permeabilidade não era a propriedade desejada na época, mas sua produção foi fundamental pelo baixo consumo de cimento, pela maior facilidade de produção, onde a mão de obra era escassa, e, também, supria a problemática causada pela falta de outros elementos construtivos, como o de alvenaria de blocos cerâmicos (ACI 522R-10, 2010).

Atualmente, o concreto permeável é utilizado nas construções de pavimentos em áreas urbanas e residenciais sendo uma maneira de minimizar os impactos provocados pela pavimentação convencional impermeável. Durante chuvas intensas, a pavimentação impermeável intensifica o escoamento das águas superficiais, o que potencializa inundações repentinas (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). Desse modo, o concreto permeável pode ser uma maneira eficaz para atender às crescentes demandas ambientais. A permeabilidade é a propriedade intrínseca do concreto permeável que permite a passagem do fluido através de seu meio (CAPUTO, 1988). Essa característica é atribuída ao fato de possuir uma rede de macro-poros interconectados que formam canais permitindo a drenagem da água (ACI 522R-10, 2010). Destaca-se, ainda, que geralmente o concreto permeável não é utilizado para pavimentos com alta solicitação de tráfego, uma vez que sua alta porosidade diminui seu desempenho mecânico (FERGUSON, 2005; HAGER, 2009; SABNIS, 2012).

Este material ganhou reconhecimento internacional em 2008 devido sua aplicação na Vila Olímpica em Pequim, na China, abrangendo uma área de aproximadamente 250 mil m² (KLEMENC, 2010), como pode ser observado na

FIGURA 1. Nota-se o potencial de aplicação do concreto permeável como pavimento e como elemento decorativo.

FIGURA 1 – PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL COLORIDO UTILIZADO NA VILA OLÍMPICA EM PEQUIM (CHINA)



FONTE: Klemenc (2010).

Segundo as principais propostas de dosagem (*Pervious Concrete Pavements* (PCP) por TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004; ACI 522R-10, 2010; ZHENG; CHEN; WANG, 2012; NGUYEN *et al.*, 2014), o concreto permeável é composto por cimento Portland, agregado graúdo (preferencialmente uniforme), água e pouco ou isento de agregado miúdo. No entanto, não há um conhecimento teórico consolidado e universalmente aceito que relacione os materiais constituintes e seu processo de confecção com suas propriedades (LIAN; ZHUGE, 2010; TORRES; HU; RAMOS, 2015; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; CAVALARO; BLANCO; PIERALISI, 2018; DEBNATH; SARKAR, 2019), e ainda possuem um grande componente empírico com base nas experiências já realizadas (ACI 522R-10, 2010).

Além disso, no estado da arte não há evidências bem fundamentadas e nem normativas que efetivamente direcionem na obtenção de suas propriedades hidráulicas. Estas normalmente são designadas através do coeficiente de permeabilidade, com notável distinção entre os valores, retratando, certamente, dados subdimensionados ou superdimensionados, como os obtidos entre diversos autores (QIN *et al.*, 2015; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; ZAETANG *et al.*, 2016; KIA;

WONG; CHEESEMAN, 2017; NGUYEN *et al.*, 2017; VALÉRIO *et al.*, 2018; HATANAKA; KAMALOVA; HARADA, 2019; DEBNATH; SARKAR, 2019; GARCIA *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2019; SANDOVAL *et al.*, 2020; MARTINS FILHO *et al.*, 2020).

Na Figura 2 pode ser observado o acabamento superficial de sete corpos de prova (CP) de concreto permeável com diferentes relações pasta/agregado (P/Ag), de 0,30 a 0,75. É notável a diferença entre essas relações, sendo em um extremo (P/Ag de 0,30) um CP com grande quantidade de vazios superficiais provenientes do baixo volume de pasta de cimento, e no outro extremo (P/Ag de 0,75) uma diminuição expressiva dos vazios superficiais à medida que o volume de pasta aumenta.

FIGURA 2– ACABAMENTO SUPERFICIAL DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES P/AG



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Propor uma metodologia para avaliação e interpretação do comportamento hidráulico do concreto permeável.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Verificar a influência dos materiais constituintes nas propriedades (hidráulicas e mecânicas) do concreto permeável, assim como os diferentes tipos e níveis de compactação.

- Determinar a influência dos materiais constituintes na consistência do concreto permeável e contribuir para projetos de dosagem.
- Avaliar a influência dos materiais constituintes (relação a/c, relação P/Ag e diâmetro dos agregados)
- Avaliar a eficiência de modelos que descrevam o comportamento hidráulico do concreto permeável, com foco para o fator de resistência do fluido e no número de Reynolds.
- Definir o regime de escoamento para concreto permeável através de condições de contorno fundamentados na mecânica dos fluidos para meios porosos.
- Atribuir significados físicos do escoamento a partir das propriedades físicas do meio poroso.
- Verificar a eficiência na utilização do método de ultrassom para previsão das propriedades do concreto permeável.

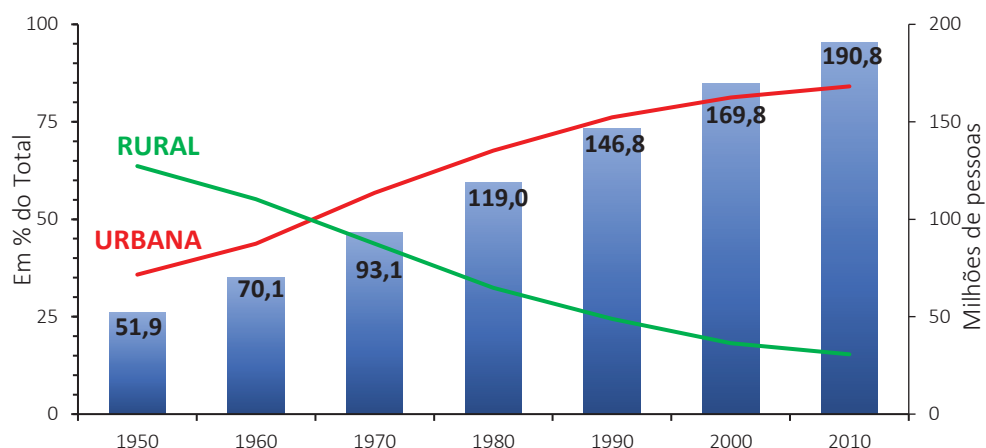
1.3 JUSTIFICATIVA

1.3.1 ASPECTO SOCIOECONÔMICO E AMBIENTAL

Nas últimas décadas houve um crescimento populacional e um desenvolvimento socioeconômico que conduziram ao êxodo da população do meio rural. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010)¹, a população Brasileira alcançou a marca de mais de 190 milhões de habitantes em 2010 (com estimativa de 211 milhões em 2020 (IBGE, 2020)), como pode ser observado na Figura 3.

¹ O IBGE retrata que houve 11 censos no Brasil após 1872, sendo o mais recente em 2010.

FIGURA 3 – CRESCIMENTO POPULACIONAL DO BRASIL RELACIONADO COM O TEMPO



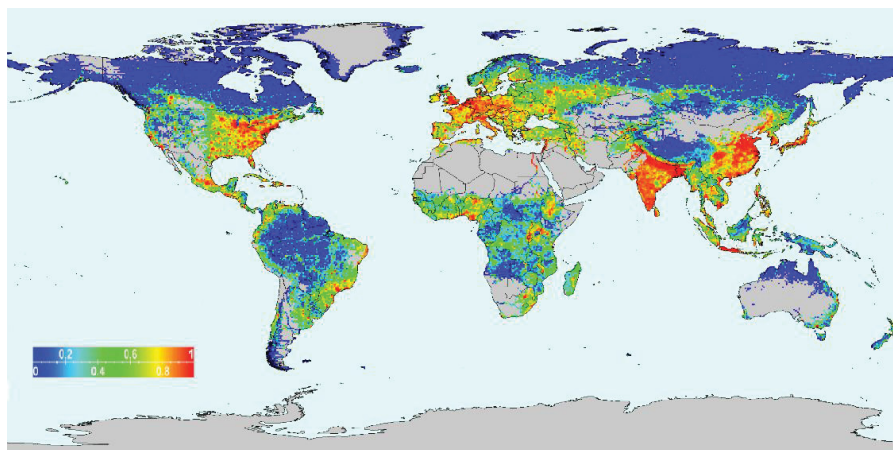
FONTE: Adaptado IBGE (2010).

Esse crescimento populacional não foi integralmente acompanhado de investimentos em infraestrutura, tendo um planejamento urbano reduzido e restrito a poucas cidades brasileiras. Sabe-se que toda expansão urbana, sem prévio planejamento, traz consigo inúmeros problemas que comprometem a qualidade de vida dos habitantes, necessitando, posteriormente, de soluções que minimizem os impactos provocados (GROSTEIN, 2001).

Neste contexto de progressiva construção urbana, houve um crescimento das áreas superficiais impermeáveis. A impermeabilização das superfícies dificulta a recarga dos aquíferos e aumenta o escoamento das águas da chuva, em especial sobre os pavimentos, que pode conduzir a enchentes e levar a população ao risco à saúde, além de gerar problemas em outros aspectos econômicos e sociais. Assim, nota-se uma relação direta da densidade populacional e as áreas impermeáveis, mostrando o quão crescente e dependentes são essas variáveis (TUCCI; CAMPANA, 1994; TUCCI, 2008).

Na Figura 4 pode ser observado a distribuição de áreas construídas com superfícies impermeáveis no mundo.

FIGURA 4 – MAPA GLOBAL DAS ÁREAS DE SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS

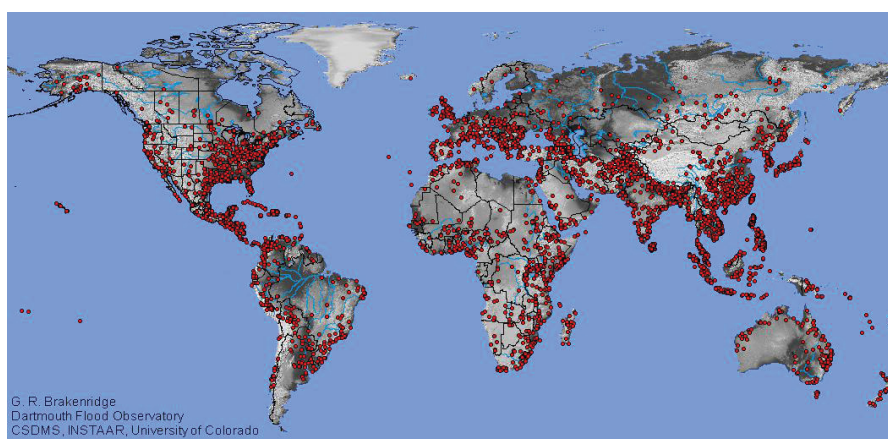


FONTE: Adaptado de Rivers in Crisis (2015).

Observa-se que a cor azul indica áreas muito permeáveis, enquanto o vermelho indica um maior índice de impermeabilidade do solo. Nota-se que a última, tem maior incidência em locais mais urbanizados.

Brakenridge (2010) registrou as principais inundações no mundo entre os anos de 1985 e 2010, como pode ser observado na Figura 5. Esta imagem mostra a problemática das inundações no contexto mundial e principalmente nacional que vêm acompanhando a população brasileira junto ao processo de urbanização.

FIGURA 5 – MAPA GLOBAL COM A IDENTIFICAÇÃO DAS INUNDAÇÕES REPORTADAS ENTRE 1985 e 2010



FONTE: Adaptado de Brakenridge (2010).

As Figuras 4 e 5 possuem relação entre a localização das superfícies impermeáveis com a incidência de inundações, justificando a necessidade de estudos visando solucionar essas situações problemáticas nas áreas de maior ocupação.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013), constatou que dos 5564 municípios brasileiros, 40,9% sofreram inundações ou enchentes nos últimos cinco anos. As principais causas destes desastres, em ordem de importância, são: Obstrução de bueiros e bocas de lobo (18,44%); Ocupação intensa do solo (17,61%); Obras inadequadas (12,96%); Dimensionamento inadequado (12,56%); Lançamento de resíduos (12,54%); Desmatamento (8,72%); Interferência física no sistema de drenagem (7,58%); Lençol freático alto (6,45%); Outros (7,91%).

Harris (2015) abordou uma matéria no Jornal The Guardian, sobre uma nova tendência para resolver os problemas da falta de água e das inundações e enchentes urbanas, por meio das “cidades esponjas”, onde quase toda gota de chuva é capturada, controlada e reutilizada. Destaca que a China escolheu 16 distritos urbanos para se tornarem cidades-piloto, onde irão desenvolver pavimentos permeáveis, além de outros sistemas. Em outra matéria do Jornal The Guardian, Knight (2017) abordou algumas soluções que a prefeitura de Chicago (EUA) vem adotando por meio dos pavimentos permeáveis. A cidade investiu significativamente na releitura da gestão de águas pluviais ao longo da última década, incluindo a construção de mais de 100 “áreas verdes” com pavimento permeável que permite que a água da chuva seja filtrada e drenada para o solo. Desta forma, 80% das chuvas são desviadas do sistema de esgoto, e as estradas não são mais inundadas.

Tucci (2005) apresentou a necessidade de investimento para um Programa Nacional de Águas Pluviais que controle os impactos na drenagem e inundação das cidades, e identificou um total de R\$ 21,5 bilhões em 24 anos para solução desses impactos, representando até 0,2% do PIB num ano.

Diante desse cenário, surge a necessidade de projetar sistemas de drenagem alternativos e mais eficazes, visto que o total de investimentos necessários para solucionar o problema é muito grande. Assim, Tucci (2005) e Cahill, Adams e Marm (2003) relatam que para minimizar esses impactos algumas medidas alternativas podem ser aplicadas, com destaque para o pavimento permeável.

1.3.2 ASPECTO TÉCNICO

Aliado aos aspectos ambientais, as características técnicas do concreto permeável despertam um interesse cada vez maior para seu emprego em construções sustentáveis, sendo promovidas pelos sistemas de certificação de edifícios, como o

LEED da *Green Building Council* (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004). Segundo Ashley (2008), o concreto permeável pode contribuir para algumas categorias na certificação do LEED, sendo: Locais Sustentáveis; Eficiência Hídrica; Materiais e Recursos; e Inovação em Design. De acordo com Tennis, Lemin e Akers (2004) e Moretti, Di Mascio e Fusco (2019), a utilização do concreto permeável em pavimentos urbanos tem um potencial contribuição para o ciclo hidrológico.

Neste sentido, a correta confecção e aplicação do concreto permeável como pavimento pode substituir parcialmente algumas obras de microdrenagem local, garantindo um melhor aproveitamento do terreno (GHAFOORI; DUTTA, 1995b). Também é utilizado para reduzir a formação de ilhas de calor em cidades, com melhor comportamento térmico que o pavimento asfáltico (FERGUSON, 2005). Devido a sua configuração porosa, o concreto permeável auxilia como barreira de som, absorvendo o ruído provocado pela interação entre pneu e pavimento, ao invés de dissipá-lo (KIM; LEE, 2010). Ainda relacionado a sua capacidade permeável, pode ser utilizado como dispositivo de drenagem em muros de arrimo (OSPINA; ERAZO, 2007) e, segundo Brattebo e Booth (2003), tem a capacidade de filtrar a água contendo diferentes tipos de contaminantes (cádmio, zinco, cobre e chumbo), reduzindo suas concentrações e poluindo menos o solo.

Kevern *et al.* (2008) destaca seu uso em função da sua propriedade mecânica, pela sua alta capacidade resistente ao ciclo gelo-degelo. Outra propriedade verificada por Park e Tia (2004) e Chen *et al.* (2019) foi que o concreto permeável pode ser utilizado como filtro na remoção de poluentes do escoamento das águas pluviais, purificando-a. Além disso, em decorrência do baixo consumo de agregados miúdos e menor utilização de pasta de cimento em relação ao concreto convencional (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017) contribui, de alguma forma, para sustentabilidade, minimizando a extração de recursos não renováveis.

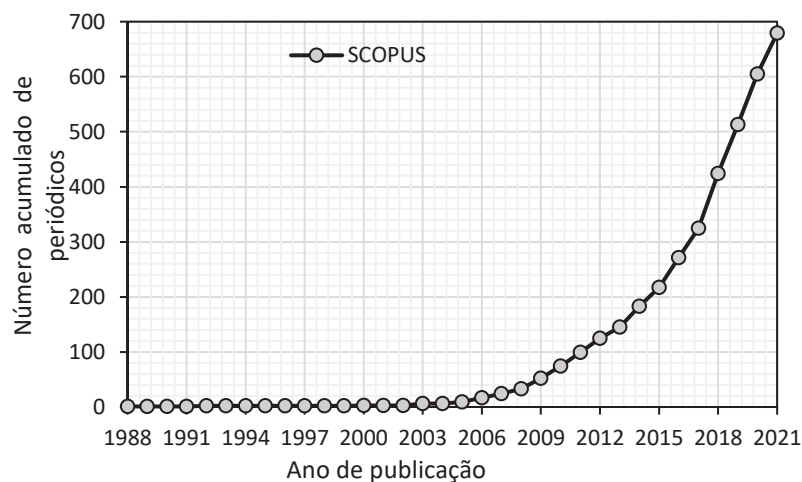
Destaca-se uma investigação conduzida por Shang e Sun (2019) com objetivo de auxiliar a remoção dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) cancerígenos contidos nos escoamentos de águas pluviais, para isso um concreto permeável verde multifuncional foi proposto a partir da introdução de argila organofílica.

Assim, o concreto permeável tornou-se interessante para a comunidade técnica e científica, com contribuições nas mais diversas áreas da ciência. Nesse

sentido, realizou-se uma pesquisa para quantificar os periódicos que vêm sendo publicados e como a temática vem sendo difundida.

Esta pesquisa resultou em artigos obtidos nas principais plataformas de dados da engenharia e ciências afins, sendo encontrado de modo recorrente as seguintes palavras-chave: “*pervious concrete*”, “*permeable concrete*” and “*porous concrete*”. No primeiro momento, merece destaque para o termo ***pervious concrete***, sendo o mais utilizado entre pesquisadores. A partir disso, através da base de dados *Scopus*, utilizou-se o termo “*pervious concrete*” nos campos de busca através do *Title*, *Abstract* e *Keywords* em *Articles*, e considerando o período de 1988 a 2021 como critério de seleção e de maior interesse do assunto, observou-se um aumento exponencial de publicações após o ano 2010, onde tinha 74 artigos indexados, para um total acumulado de 679 artigos em 2021, como pode ser observado na Figura 6. Além disso, nota-se a diversidade de nacionalidades entre os pesquisadores, retratando uma temática de interesse global².

FIGURA 6 - CRONOLOGIA DE PUBLICAÇÕES DE PERIÓDICOS NA SCOPUS: *PERVIOUS CONCRETE*



² Destaca-se nesta nota de rodapé os principais pesquisadores e países de atuação na área do concreto permeável:

- **Nome do pesquisador por relevância / Local de atuação:** Kevern, J. T (Estado Unidos); Biligiri, K. P (Índia); Haselbach, L (Estados Unidos); Zhang, J (China); Cui, X (China); Chandrappa, A. K (Índia); Schaefer, V. R (Estados Unidos); Wang, K (Estados Unidos), Chindaprasirt, P (Tailândia).
- **Publicações por país:** Estados Unidos (213); China (155); Índia (101); Iran (29); Canadá (23); Brasil (20), Taiwan (19), Malaysia (16), Austrália (14).

As produções científicas estão mais relacionadas a testes experimentais com diferentes composições e nos resultados de resistência mecânica, porosidade e coeficiente de permeabilidade (darciana), estabelecendo correlações entre suas propriedades. Além disso, algumas publicações buscam correlacionar dados laboratoriais com aplicações *in loco*, e da utilização de resíduos da construção civil (RCC) na produção do concreto permeável. No entanto, não foram observados avanços expressivos em uma metodologia de dosagem que auxilie de modo efetivo na produção do concreto permeável.

Nota-se que o estado da arte tem por base interpretações empíricas, ainda que fundamentalmente relevantes, generalistas para a tecnologia do concreto permeável, sem aprofundamento na sua principal propriedade, e que justifica seu uso, a permeabilidade³. Dentre as lacunas de conhecimento, destaca-se a ausência de metodologias laboratoriais normatizadas para caracterizar o escoamento do concreto permeável – em diferentes permeâmetros. Também não há critérios bem definidos para avaliação e interpretação do comportamento hidráulico do concreto permeável, sem parâmetros hidráulicos que avaliem a influência da heterogeneidade do meio poroso no seu escoamento. Desse modo, ressalta-se a necessidade de atualizações normativas com diretrizes que evitem a progressiva inconsistência metodológica e de definições nos diversos artigos científicos, que realizam análises distintas do escoamento para o mesmo objeto de estudo, levando a subdimensionamentos ou superdimensionamentos das propriedades do concreto permeável.

Destaca-se que as primeiras recomendações normativas publicadas para o concreto permeável foram: Manual da PCP (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004); e ACI 522R-10 (2010). Ambas abordam aspectos técnicos do material e seus constituintes, métodos simplificados de dosagem e ensaios de caracterização. Nos últimos anos, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) lançou uma coletânea de normativas para caracterização do concreto permeável no estado fresco e endurecido:

- ASMT C1754/C1754M-12: Métodos para determinar a densidade e conteúdo de vazios do concreto permeável no estado endurecido;

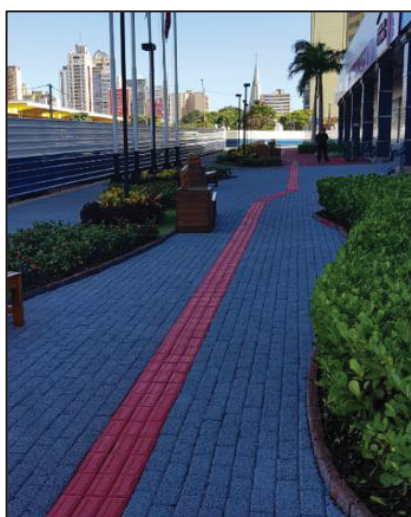
³ Estudar a permeabilidade é estudar a dinâmica dos fluidos em meios porosos.

- ASMT C1747/C1747M-13: Métodos para determinar a resistência a degradação do concreto permeável por impacto e abrasão;
- ASMT C1688/C1688M-14: Métodos para determinar a densidade e conteúdo de vazios do concreto permeável no estado fresco;
- ASMT C1701/1701M-17: Método para determinar a permeabilidade do concreto permeável.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) também publicou uma normativa sobre concretos permeáveis (ABNT NBR 16416:2015 – Pavimentos permeáveis de concreto: Requisitos e Procedimentos), com enfoque dado para blocos intertravados. O ensaio de caracterização da permeabilidade apresentado pela ABNT NBR 16416 (2015) é semelhante ao da ASTM C1701 (2017). Ambas as normas só regulamentam o ensaio de permeabilidade *in loco*, não existindo normativas com procedimentos de ensaios para caracterizar a permeabilidade de CPs em laboratório, o que vem gerando interpretações distintas em relação ao coeficiente de permeabilidade do concreto permeável (*discutido no Capítulo 5*).

Por fim, na Figura 7 pode ser observada uma calçada de pedestre com a utilização de *pavers* produzidos com concreto permeável, aplicação cada vez mais em evidência no meio urbano na cidade de Maringá/PR e em todo território nacional, contribuindo para a drenagem urbana e garantindo a sobrevivência da vegetação local.

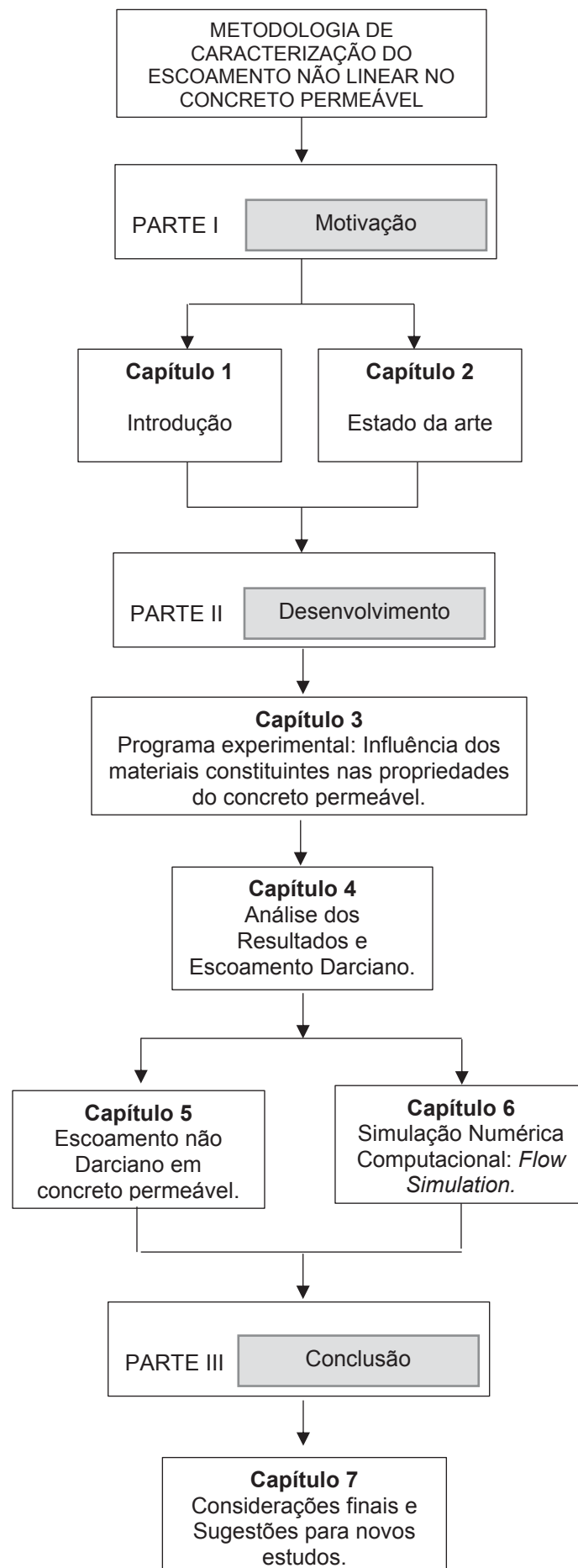
FIGURA 7 – CALÇADA COM PAVERS DE CONCRETO PERMEÁVEL EM MARINGÁ/PR



1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Diante das conjecturas adotadas na contextualização do tema, esta tese será organizada em sete capítulos, dentro de três abordagens (parte I, parte II e parte III), a fim de contribuir, de maneira lógica e sequenciada, para os objetivos propostos, como pode ser observado na Figura 8.

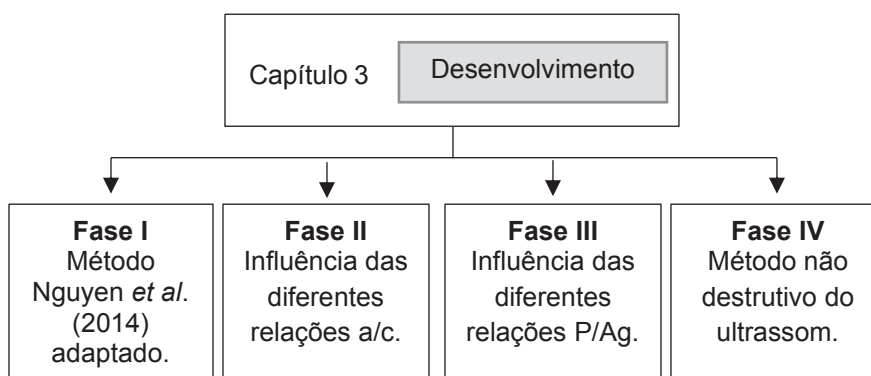
FIGURA 8 - ORGANIZAÇÃO DA TESE



A parte I aborda as motivações que fundamentam a tese, e é composta pela 1.1 Contextualização, 1.2 Objetivos, 1.3 Justificativa e 1.4 Organização da tese, elencados pelo Capítulo 1. O estado da arte sobre o concreto permeável foi sistematicamente abordado no Capítulo 2, com as principais propriedades e fatores que as influenciam, com os principais métodos de dosagem e de caracterização, incluindo pelo método não destrutivo do ultrassom. Além disso, este capítulo inclui uma ampla discussão sobre o comportamento hidráulico do concreto permeável, com relevância para seu regime de escoamento. À medida que o conhecimento é exposto, são levantadas discussões sobre o estado da arte e lacunas ainda presentes, trazendo em inúmeros momentos as justificativas para o desenvolvimento da tese, com abordagens significativas sobre a linearidade e não linearidade do escoamento em meios porosos e, em específico, em concreto permeável.

A parte II aborda o desenvolvimento da tese pelos Capítulos de 3 a 6, abrangendo do programa experimental até a análise dos resultados. O Capítulo 3 descreve a abordagem metodológica utilizada para verificar a influência dos materiais constituintes nas propriedades finais do concreto permeável, com foco para métodos avaliativos da consistência do concreto permeável. Para isso, foram realizadas quatro abordagens, divididas nas Fases I a IV, como pode ser observado na Figura 9.

FIGURA 9 - FASES METODOLOGICAS DO CAPÍTULO 3



Na Fase I foi determinada a consistência da pasta de cimento “limite” através da metodologia Nguyen *et al.* (2014) adaptada, o que demonstrou ser uma excelente ferramenta para projetos de dosagem do concreto permeável. Posteriormente, na Fase II, foi verificado a influência das diferentes relações a/c em suas propriedades finais e, complementando a análise, na Fase III foi verificado a influência das diferentes

relações P/Ag. Além disso, há descrição dos ensaios utilizados nas definições da porosidade total e efetiva, densidade no estado fresco e endurecido, resistência à compressão, e da abordagem experimental em permeâmetro de carga constante, a fim de caracterização das propriedades hidráulicas do concreto permeável. Por fim, na Fase IV, a aplicação do método não destrutivo, método do ultrassom, para caracterização do CP de concreto permeável.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e análises para as quatro fases mencionadas anteriormente, permitindo estabelecer correlações e regressões que contribuem nas explicações das propriedades do concreto permeável. Utilizando-se inicialmente de uma abordagem linear, Lei de Darcy, o escoamento no concreto permeável foi caracterizado por distintos coeficientes de permeabilidade. Estes resultados mostraram-se não conclusivos para avaliar as propriedades hidráulicas do meio poroso, retratando, inclusive, a abordagem erroneamente utilizada no atual estado da arte. Assim, o principal problema de pesquisa desta tese doutoral foi elencado.

Desse modo, o Capítulo 5 é estruturado para caracterizar o escoamento não darciano em concreto permeável. Para isso, equações não lineares, como a proposta por Forchheimer, juntamente com outros modelos que buscam explicar o fenômeno hidrodinâmico no meio poroso, mostram-se como solução. Assim, foram analisados dados da literatura e dados experimentais, permitindo verificar a influência da conformação do meio poroso, e sua conectividade, no escoamento. Além disso, foi demonstrado, a partir da formulação proposta por Lofrano *et al.* (2020), a definição do regime de escoamento, utilizando-se o número de Reynolds e o fator de atrito no meio poroso. Por fim, foi realizado uma campanha experimental complementar para uma diversidade de traços, - diferentes tipos de compactação, características físicas dos agregados – para analisar de modo robusto os conceitos até então discutidos para caracterização do escoamento no concreto permeável.

No Capítulo 6, foi realizada uma simulação numérica computacional da dinâmica do fluido no meio poroso, através do *SolidWorks Flow Simulation*, permitindo obter ricas interpretações do escoamento não linear para elevadas cargas hidráulica.

A parte III finaliza com as conclusões, no Capítulo 7, e, posteriormente, sugestões para novos estudos, com bases nos resultados e análises realizadas ao longo desta tese. Destaca-se que estudar as propriedades hidráulicas do concreto permeável é relativo a estudar qualquer meio com macroporosidade, sendo assim,

suas conclusões são de interesse para as mais diferentes áreas da ciência e tecnologia dos materiais.

Por fim, os Apêndices 1, 2, 3 e 4 representam importantes itens desta tese, adicionando informações relevantes referentes ao estudo, assim como os dados obtidos laboratorialmente. Resumidamente, no Apêndice 1 foram apresentados os coeficientes de permeabilidade obtidos a partir de uma abordagem darciana, justificando em partes o que motivou os estudos desta tese. No Apêndice 2 foram tratados os dados obtidos na literatura por Qin *et al.* (2015), de modo que correspondesse a metodologia utilizada nesta tese. Na sequência, no Apêndice 3, foram realizadas a mesma abordagem, porém com os dados obtidos experimentalmente. No Apêndice 4 foram analisadas as propriedades físicas do concreto permeável considerando a totalidade dos traços, com diferentes composições e métodos de compactação.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 MEIOS POROSOS

O meio poroso é, direta ou indiretamente, objeto de estudo das mais variadas áreas da ciência aplicada e da engenharia, com aplicações para diversos fins. Através do levantamento realizado nas múltiplas áreas do conhecimento, Lofrano (2018) destaca onde há relevância dos meios porosos, sendo:

- Engenharia
 - Civil: hidráulica, hidrologia, mecânica dos solos, patologias das estruturas;
 - Materiais: nanomaterias, adsorção e dessorção;
 - Química: colunas recheadas, células de combustível;
 - Agronômica: irrigação, edafologia;
 - Mecânica: acústica, tribologia, isolamento térmico;
 - Petróleo: extração de óleo e gás;
 - Ambiental: remediação, infiltração, incineração, filtração, separação por membranas.

Os diversos meios porosos, naturalmente observado no universo físico (solos, espumas, peças cerâmicas, alimentos e outros), devem possuir determinadas especificidades para suas respectivas aplicabilidades, uma vez que todos são constituintes de uma fase sólida e por vazios. Essa fase assume um papel fundamental e, dependendo da sua distribuição e conexão, promovem vazios que podem ser permeáveis ou, apenas, preenchidos por um fluido.

Nesta tese, o meio poroso estudado é o concreto permeável, sendo um tipo especial de concreto com uma macroporosidade aberta e conectada, permitindo que um fluxo de água atravessasse o material. Possui em sua fase sólida baixo consumo, ou nulo, de agregado miúdo e o volume de pasta apenas o suficiente para envolver os agregados graúdos. Além disso, em sua produção, possui uma consistência seca, com abatimento do tronco cone (*slump test*) próximo a zero (ACI 522R-10, 2010; NEITHALATH; DEO, 2011; PIERALISI, 2016; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). Segundo dados extraídos da literatura, a porosidade do concreto permeável pode alcançar valores de até 35% e o coeficiente de permeabilidade, de Darcy, pode atingir

valores de até 33 mm/s (KIA; WONG; CHEESEMAM, 2017). Deve-se ressaltar que para a maioria das aplicações a permeabilidade é a principal propriedade do concreto permeável, no entanto a resistência mecânica é um critério determinante (ACI 522R-10, 2010; LIAN; ZHUGE, 2010; SRIRAVINDRARAJAH; WANG; ERVIN, 2012; BHUTTHA *et al.*, 2013; IBRAHIM *et al.*, 2014; YEIH *et al.*, 2015).

2.2 COMPOSIÇÕES DO CONCRETO PERMEÁVEL

A composição do concreto permeável varia dependendo de sua finalidade, com influência direta dos tipos de materiais empregados e do processo de compactação aplicado no estado fresco (GHAFOORI; DUTTA, 1995a; CAVALARO; BLANCO; PIERALISI, 2018).

A Tabela 1 apresenta dados extraídos da literatura com composições utilizadas na produção de concreto permeável. Dito levantamento bibliográfico mostra uma variação no consumo de cada material e deve-se, em parte, ao fato de não existir um método de dosagem recomendado e validado.

TABELA 1 – COMPOSIÇÕES DO CONCRETO PERMEÁVEL

Referência	Traço (Em massa)	Cons. de cimento (kg/m³)	Agregados (kg/m³)	Água/ Cimento
Nguyen <i>et al.</i> (2017)	1:5,2	301	1684	0,37
Chandrappa e Biligiri (2016a)	1:3 a 1:5	321,42 a 487,45	1373,8 a 1691,67	0,25 a 0,35
Kim, Gaddafi e Yoshitake (2016)	1: 6,52	311	2029	0,3
Akand, Yang e Gao. (2016)	1:4	357 a 383	1532,8 a 1638,8	0,27 a 0,33
Zaetang <i>et al.</i> (2016)	1:4,54	316	1435	0,24
Sumanasooriya <i>et al.</i> (2015)	1:4,18 a 1:8,46	199 a 374	1564 a 1683	0,31 a 0,33
Gaedicke <i>et al.</i> (2014)	1:5,2	284	1453	0,3
Yahia e Kabagire (2014)	-	-	1500 a 1700	0,3
Gesoglu <i>et al.</i> (2014)	1:3,54	450	1594	0,27
Nguyen <i>et al.</i> (2014)	1:4,93	309	1524,6	0,3
Lim, Twan e Fwa (2013)	1:3,15 a 1:6,44	242 a 495	1560	0,20 a 0,30
Bhuttha <i>et al.</i> (2013)	1:5 a 1:6,92	260 a 320	1620 a 1800	0,27 a 0,30
Sumanasooriya e Neithalath (2011)	1:2,24 a 1:8,17	206 a 560	1253 a 1683	0,31 a 0,33
Neithalath e Deo (2011)	1:2,37 a 1:5	303 a 555	1322 a 1583	0,30 a 0,33
Huang <i>et al.</i> (2010)	1:4,5	320,2 a 352,6	1440,8 a 1586,9	0,35
Neithalath <i>et al.</i> (2010)	1:5	305 a 314	1524 a 1559	0,33
ACI 522R-10 (2010)	1:4,0 a 1:4,5	250 a 400	1100 a 1500	0,26 a 0,40
Chindaprasirt <i>et al.</i> (2008)	1:3,45 a 1:5,96	260 a 449	1550	0,28 a 0,34
Ghaffori e Dutta (1995a)	1:4 a 1:6	300 a 413	1651 a 1800	0,37 a 0,42

Nota-se que os traços (em massa) estão variando entre 1:2 a 1:8,46, com um consumo de cimento de 150 a 700 kg/m³ e de agregados 1100 a 2800 kg/m³. Nesta revisão da literatura, as faixas granulométricas dos agregados utilizados na produção do concreto permeável são as mais variadas, encontram-se registros de seu uso dentro do intervalo granulométrico de 2,36 mm a 19 mm, e com diferentes formas e origens mineralógicas. Além disso, Lian e Zhuge (2010) relatam que dependendo do desempenho requerido, podem ser adicionados aditivos químicos, como superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade, e adições minerais, como a sílica.

2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM

Atualmente, não há um método consagrado para a dosagem do concreto permeável, sendo comum utilizar-se de diretrizes indicadas na literatura e baseados em dosagens empíricas. Ressalta-se, sem sombra de dúvidas, que há uma complexidade em se estabelecer parâmetros bem definidos de dosagem para o concreto permeável, uma vez que a variável porosidade e permeabilidade, diferentemente do concreto convencional, são incrementadas de modo valioso e indissociável. Desse modo, este item buscou identificar as propostas de dosagem desenvolvidas, iniciando pelo manual *Pervious Concrete Pavements* (PCP) proposto por Tennis, Lemin e Akers (2004) na *Portland Cement Association* (PCA); pela metodologia do *American Concrete Institute* (ACI 522R-10, 2010); o método proposto por Zheng *et al.* (2012); e pelo método proposto por Nguyen *et al.* (2014).

2.3.1 Manual do PCP (Tennis, Lemin e Akers, 2004)

O procedimento de dosagem do Manual do PCP (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004) para concreto permeável utiliza como base a metodologia abordada na ACI 211.3R-02 (2002) “*Guide for selecting proportions for no-slump concrete*”, para concretos de consistência seca, tendo um tópico específico para o concreto permeável. Além disso, o manual apresenta uma tabela (reproduzida, aqui, na Tabela 2) com intervalos característicos das proporções dos materiais utilizados no concreto permeável, obtidos com esforço conjunto da *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA) e da *Portland Cement Association* (PCA).

TABELA 2 – PROPORÇÕES DE MATERIAIS NO CONCRETO PERMEÁVEL

Material	Proporção
Consumo de cimento (kg/m ³)	270 a 415
Consumo de agregado (kg/m ³)	1190 a 1480
Relação água/cimento (em massa)	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado (em massa)	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/graúdo (em massa)	0 a 1:1

FONTE: Tennis, Lemin e Akers (2004).

A fim de definir a relação a/c ideal, Tennis, Lemin e Akers (2004) propuseram um procedimento de inspeção visual a ser realizado durante o processo de mistura do concreto permeável. Tal procedimento consiste em adicionar água gradualmente na mistura e, a cada nova adição, retirar manualmente uma pequena quantia do material, pressioná-la com as mãos e avaliar seu comportamento. Na Figura 10 podem ser observados os três comportamentos que a mistura pode apresentar com as diferentes relações a/c. A Figura 10a apresenta o concreto permeável com uma baixa relação a/c, ao apertá-lo com as mãos os agregados não ficam unidos (evidenciando baixa coesão da mistura). Na Figura 10b a relação a/c está adequada, com as partículas inteiramente cobertas com pasta, de modo que ao apertar com as mãos o concreto forma um conjunto único que não se desprende e não perde sua estrutura porosa. Na Figura 10c o concreto permeável apresenta relação a/c superior ao necessário, e ao apertar com as mãos perde sua estrutura porosa, fazendo com que a pasta segregue.

FIGURA 10 – CONCRETO PERMEÁVEL EM ESTADO FRESCO COM BAIXA RELAÇÃO A/C (A), RELAÇÃO A/C IDEAL (B) e ALTA RELAÇÃO A/C (C)



FONTE: Tennis, Lemin e Akers (2004).

Após a moldagem e cura dos CPs, estes devem ter suas propriedades, - porosidade, permeabilidade e desempenho mecânico - ensaiadas e analisadas. Caso as propriedades obtidas não tenham alcançado os valores desejados, o traço deverá ser ajustado e novos CPs deverão ser fabricados e ensaiados. Esse procedimento deverá ser repetido até que seja obtido um traço com o desempenho desejado. Ressalta-se que nenhuma menção aos procedimentos de ensaios para caracterização do concreto permeável é feita por Tennis, Lemin e Akers (2004).

As instruções para a dosagem do concreto permeável foram posteriormente revistas pela ACI 522R-10 (2010) que, basicamente, uniu e atualizou as informações apresentadas por Tennis, Lemin e Akers (2004) e corrigiu alguns parâmetros da metodologia de dosagem abordada na ACI 211 3R-02 (2002) para concreto permeável, que delimita intervalos de proporcionamento, no entanto reprovada em 2009.

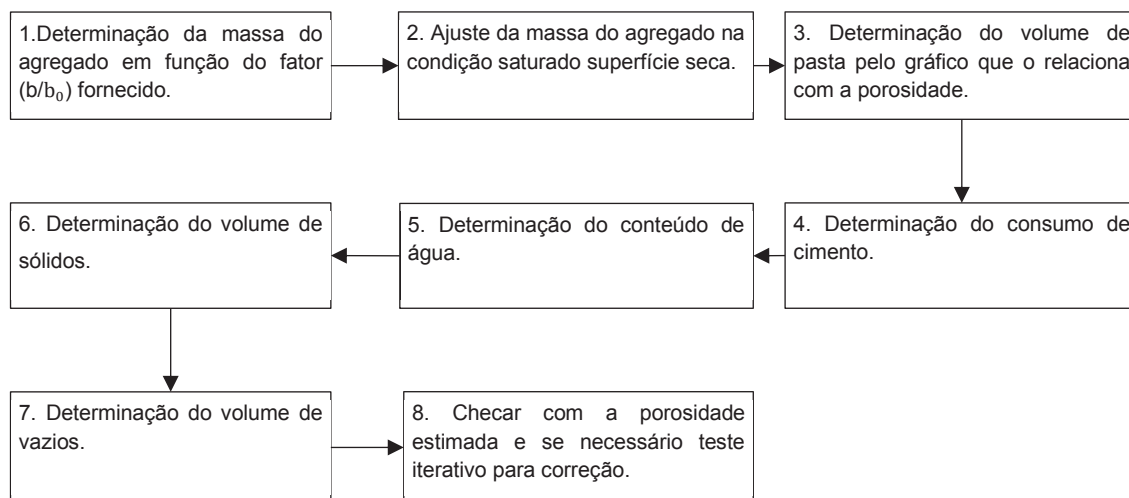
2.3.2 ACI 522R-10 (2010)

O método de dosagem proposto pela ACI 522R-10 (2010) utiliza um procedimento de tentativa e erro, onde é possível relacionar o traço com as propriedades do concreto permeável (porosidade, permeabilidade e resistência à compressão) por meio de ábacos, até obter o desempenho desejado. Neste sentido, a filosofia deste método de dosagem aborda que o correto proporcionamento dos materiais é relacionado com a obtenção do menor volume de pasta necessário para unir os agregados uns aos outros, desde que sejam mantidas a estrutura porosa, a resistência mecânica e a trabalhabilidade da mistura.

Este método teve seu desenvolvimento apoiado nos resultados experimentais obtidos por Meininger (1998) e pelas considerações da *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2007) e do Manual do PCP (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004). Os parâmetros propostos para serem utilizados na dosagem são: volume de pasta; relação a/c; tamanho dos agregados, usualmente entre 9,5 a 19 mm; massa de adição de agregado miúdo; e grau de compactação.

Na Figura 11 pode ser observado um fluxograma com o procedimento de dosagem para o concreto permeável, sendo divididos em 8 etapas.

FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DO MÊTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA ACI 522R-10



FONTE: Adaptado ACI 522R-10 (2010).

2.3.3 Zheng *et al.* (2012)

Através dos procedimentos empíricos e dos resultados obtidos, Zheng *et al.* (2012) propôs um método de dosagem para o concreto permeável dividido em três etapas, com a determinação do: (1) Consumo de cimento; (2) Consumo dos agregados; e (3) Relação a/c. Nestas etapas são utilizadas regressões obtidas a partir de sua campanha experimental.

Resumidamente, para determinar o consumo de cimento (kg/m^3) necessita-se de duas variáveis: resistência à compressão ($\sigma_{c,d}$) e o diâmetro correspondente a malha de peneira que passa 10% dos agregados (D_{10}). Posteriormente, deve-se determinar o consumo de agregados, G (kg/m^3), para o volume unitário de concreto permeável, por uma relação com a massa específica (ρ), $G = 0,98 \cdot \rho$. Por fim, determinar a relação a/c com as variáveis já encontradas: resistência à compressão ($\sigma_{c,d}$), tamanho efetivo das partículas em (D_{10}) e o consumo de cimento. O valor obtido pode ser analisado e ajustado com base na experiência do pesquisador, caso o conteúdo de água não promova uma mistura uniforme e com consistência adequada. Ainda assim, a relação a/c entre 0,33 e 0,42 é sugerida.

2.3.4 Nguyen *et al.* (2014)

O método de dosagem proposto por Nguyen *et al.* (2014) parte da premissa de que a pasta de cimento apenas envolve e conecta os agregados, e seu procedimento está dividido em três etapas: (1) Determinação do volume dos agregados; (2) Determinação do volume de pasta; (3) Determinação da relação a/c. Abaixo está descrito cada etapa a ser desenvolvida para a obtenção do traço de concreto permeável.

Etapa 1

Para determinar o volume de agregado ($V_{Ag.}$) utiliza-se uma das quatro hipóteses apresentadas a seguir:

1. O agregado é assumido com forma esférica, podendo ser caracterizado apenas pelo diâmetro. Assume-se que os agregados são compactados ao máximo, permitindo obter o volume sólido dos agregados ($V_{Ag.}$), o excesso de pasta (V_{EP}) que cobre os agregados, e a pasta compactada (V_{PC}) que preenche os vazios do esqueleto granular e que pode ser extraída em função do volume de vazios desejado.

2. Nesta hipótese, considera-se insignificante a espessura da camada de pasta quando comparada ao tamanho dos agregados graúdos. Para que os vazios não sejam preenchidos pela pasta compactada (V_{PC}), considera-se que o volume de pasta compactada é igual o volume de vazios (V_v) do conjunto granular.

3. A espessura do excesso de pasta não é a mesma para diferentes tamanhos de agregados, mas é proporcional ao tamanho do agregado.

4. Para o concreto permeável, uma composição é ideal quando os agregados são apenas cobertos com o excesso de pasta (V_{EP}) até atingir uma resistência suficiente, e o espaço entre os agregados é mantido vazio para que a água possa passar através da matriz.

Independente destas hipóteses, a utilização do agregado miúdo (areia) é fixada em 7% em relação a massa do agregado graúdo.

Etapa 2

Deve-se quantificar o volume de pasta de cimento que envolve as partículas, garantindo trabalhabilidade e criando uma área de contato para transferência de carga. A mistura se torna mais trabalhável à medida que mais pasta de cimento é incorporada, embora sua porosidade diminua. Neste método o volume de pasta de cimento é obtido considerando a área superficial dos agregados e da espessura da camada de pasta.

Etapa 3

Para determinar a relação a/c limite é realizado um teste de drenagem da pasta. Para isso, ocorre a variação na demanda de água da mistura e observa-se o comportamento obtido pela pasta após a vibração do concreto no estado fresco, em um peneirador mecânico, por 15 s, sobre peneira de abertura inferior ao agregado. Neste método a razão entre o volume de agregado e o volume de pasta de cimento é mantida constante, e a massa de agregado utilizada é de 2,5 kg na condição saturado superfície seca. A relação a/c adotada só é adequada quando nenhuma quantidade de pasta segregar.

O método apresentado por Nguyen *et al.* (2014) baseia-se em um estudo misto: teórico-experimental. Permitindo sua aplicação a qualquer tipo e tamanho de agregado. Além disso, propõem um procedimento para determinar a relação a/c e leva em consideração o efeito de um tipo de compactação, por mesa de vibração.

2.4 PREPARO E PRODUÇÃO

2.4.1 Procedimento de mistura

Schaefer *et al.* (2006) propuseram o seguinte procedimento de mistura para o concreto permeável:

- Adicionar uma quantidade de cimento (<5% em massa) com todo agregado e misturar cerca de um minuto, até as partículas serem completamente revestidas;

- Adicionar o restante do cimento e a água, misturando durante três minutos;
- Repousar durante três minutos e depois misturar durante mais dois minutos antes da utilização.

No procedimento adotado por PIERALISI (2016), inicialmente foram adicionados agregados e cimento e misturados por 60 s. Em seguida, 70% do conteúdo de água foi adicionado e misturado por mais 30 s. Posteriormente, a água restante e o aditivo foram adicionados e misturados por mais 60 s.

No processo de confecção realizado por SHABALALA (2017), adicionou-se os materiais secos, cimento e agregados, e foram misturados por um minuto. Posteriormente ocorreu a adição gradual de água durante um minuto e após misturou-se por mais um minuto.

2.4.2 Adensamento e cura em laboratório

Dentre os tipos de compactação utilizados em laboratório, destacam-se: Suleiman *et al.* (2006) e Zaetang *et al.* (2016) realizaram a compactação em conjunto por haste e mesa vibratória; Nguyen *et al.* (2014) utilizaram a compactação por mesa vibratória; PIERALISI, Cavalaro e Aguado (2016) realizaram compactação do concreto permeável em prensa uniaxial até atingir uma carga de 10 KN; Bonicelli *et al.* (2015) e Gaedicke *et al.* (2016) utilizaram o martelo de Proctor. Meininger (1988); Rizvi *et al.* (2009) e Khankhaje *et al.* (2016) compactaram suas amostras com haste em conjunto com o martelo de Proctor. Desta maneira, pode-se dizer que os processos de compactação mais utilizados em laboratório são: uso de haste variando o número de golpes (de 5 a 25 golpes por camada, por exemplo); martelo de Proctor; e vibração com diferentes tempos e frequências de aplicação.

Duas situações são observadas relativas à compactação ineficiente: baixo grau de compactação (ou compactação insuficiente) acarreta baixa resistência mecânica do concreto permeável, devido ligações não consolidadas entre os agregados; e elevado grau de compactação (ou compactação excessiva) promove segregação da pasta, podendo tampar os poros de uma camada e, em casos extremos, deixar o concreto impermeável (MEININGER, 1988; SCHAEFER *et al.*, 2006; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2011; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

Quanto ao processo de cura, a ASTM C192 (2018) indica que após o desmolde, os CPs devem ser armazenados durante 28 dias em uma câmara úmida com umidade superior a 98% e uma temperatura de aproximadamente 22,2 ° C (NGUYEN *et al.*, 2014; GAEDICKE *et al.*, 2014; KEVERN *et al.*, 2016; TORRES; HU; RAMOS, 2015; GAEDICKE *et al.* 2016). Por outro lado, é comum encontrar na literatura o uso de cura submersa em água com temperatura de aproximadamente 20 °C por 28 dias (LIAN; ZHUGE, 2010; SRIRAVINDRARAJAH; WANG; ERVIN, 2012; ZHONG *et al.*, 2016; PIERALISI, 2016).

2.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL

2.5.1 Porosidade

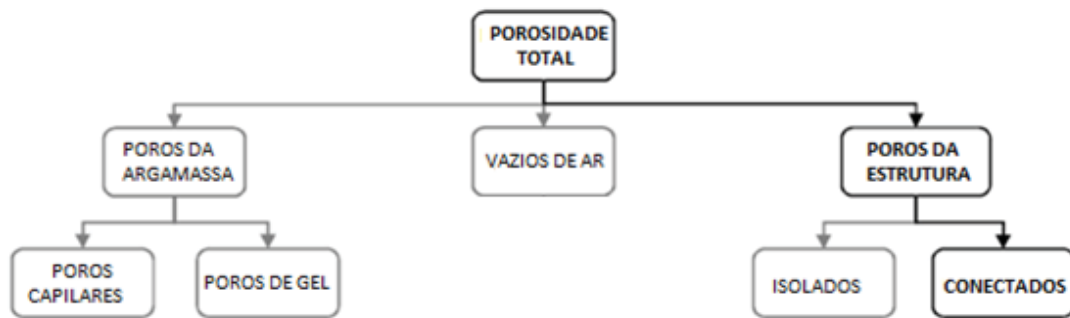
A porosidade do concreto permeável é um fator relevante em seu desempenho e possui relação com outras propriedades, como o coeficiente de permeabilidade e com o desempenho mecânico (resistência à compressão e à tração). Quanto maior a porosidade do concreto permeável, maior seu coeficiente de permeabilidade e menor sua resistência mecânica (MEININGER, 1988; GHAFoori; DUTTA, 1995a; JIANG; XIAO, 2019). Além disso, como é de se esperar, o aumento do volume de pasta diminui a porosidade entre os agregados (YANG; JIANG, 2003; TORRES; HU; RAMOS, 2015).

Os poros presentes no concreto são formados, principalmente, pela baixa relação entre pasta de cimento e agregado gráudo e são dependentes de outros fatores como: a característica física dos agregados; relação a/c; e o nível de compactação, correlações verificadas por diversos pesquisadores (PARK; TIA, 2004; CROUCH *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2006; WANIELISTA *et al.*, 2007; CHINDAPRASIRT *et al.*, 2008; ACI 522R-10, 2010; KEVERN *et al.*, 2010; LIAN; ZHUGE, 2010; NEITHALATH *et al.*, 2010; PARK *et al.*, 2010; NEITHALATH; DEO, 2011; GAEDICKE *et al.*, 2014; IBRAHIM *et al.*, 2014; PIERALISI, 2016; WU *et al.*, 2016; ZHONG; WILLE, 2016; NGUYEN *et al.*, 2017).

Segundo recomendações da ACI 522R-10 (2010), a porosidade não deve ultrapassar 35%, em decorrência da baixa resistência mecânica encontrada em concretos permeáveis com porosidade superior.

Segundo Pionalisi (2016), a porosidade total do concreto permeável pode ser dividida em três tipos: poros da argamassa, vazios de ar e poros da estrutura granular, como apresentado na Figura 12. Os poros da estrutura granular podem ser isolados ou conectados entre si, sendo este último de grande relevância para o escoamento do fluido.

FIGURA 12 – TIPOS DE POROS NO CONCRETO PERMEÁVEL



FONTE: Adaptado Pionalisi (2016).

A norma da ASTM C1688 (2014) indica os procedimentos utilizados para calcular a densidade e porosidade total do concreto permeável no estado fresco. Para isso determina-se a relação entre a densidade no estado fresco (ρ_f) e a densidade teórica (ρ_t), obtida pelo proporcionamento dos materiais utilizados em cada traço do concreto permeável. A porosidade do concreto no estado fresco ($P_{t,f}$), em %, é calculado pela Equação 1.

$$P_{t,f} = \frac{\rho_t - \rho_f}{\rho_t} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

ρ_t : densidade teórica (kg/m³);

ρ_f : densidade do concreto permeável fresco (kg/m³);

$P_{t,f}$: porosidade total (%).

A norma da ASTM C1754 (2012) indica os procedimentos utilizados para determinar a densidade e porosidade do concreto permeável no estado endurecido. A partir do Método A da referida norma, é obtido a massa do CP de concreto no estado seco e seu peso hidrostático. Esta abordagem é realizada por diversos autores,

baseado no método de deslocamento de água, - o princípio de flutuabilidade de Arquimedes (MONTES *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2018; ONG *et al.*, 2020; LADERLE *et al.*, 2019; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2018; CHANDRAPPA *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; DEBNATH; SARKAR, 2019; PIERALISI; CAVALARO; AGUADO, 2017; KEVERN *et al.*, 2018; SANDOVAL *et al.*, 2020). Assim, a porosidade no estado endurecido (P_t), em %, pode ser calculada pela Equação 2.

$$P_t = \left[1 - \frac{4 \cdot (W_1 - W_2)}{\rho_w \cdot \pi \cdot \phi_S^2 \cdot L_S} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

W_1 : massa no estado seco (kg);

W_2 : massa hidrostática (kg);

ϕ_S : diâmetro da amostra;

L_S : altura da amostra (m);

ρ_w : densidade da água a 25 °C.

A porosidade efetiva foi obtida utilizando-se o procedimento proposto por Neithalath *et al.* (2006; 2010), que também é indicado pela ACI 522R-10 (2010), e utilizada no atual estado da arte (DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010; KUO; LIU; SU, 2013; SANDOVAL *et al.*, 2017; ONG; JAGADEESH; SU, 2020). Nestes ensaios, o CP de concreto permeável em estado endurecido deve estar na condição saturada superfície seca após um período de 24h submerso. Após isso, deve-se garantir a estanqueidade em sua base e em sua lateral através de um papel filme, para posteriormente inseri-lo no molde metálico (utilizado para moldagem do CP), criando um estado de confinamento do material. Por fim, adiciona-se água até preencher seus poros. A massa de água adicionada deve ser convertida para a porosidade efetiva (P_e), segundo a Equação 3.

$$P_e = \left[\frac{W_A}{\rho_w \cdot V_M} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

W_A : massa de água (kg);

ρ_w : densidade da água (kg/m³);

V_M : volume do molde do CP (m³).

2.5.1.1 Análise das definições de porosidade

Uma considerável discussão pode ser estabelecida sobre o termo “porosidade”, que a princípio parece algo fácil de se conceituar. No entanto, em decorrência das diversas maneiras de se medir porosidade fazem com que cada método apresente um significado específico.

De modo geral, há consenso sobre o que se denomina “porosidade total”. Esta pode ser definida como a porcentagem de volume de poros sobre o volume total do CP, sendo que o volume de poros é a diferença entre o volume total do CP e o volume de sua parcela sólida. O problema surge quando se fala de termos como “porosidade aberta”, “porosidade conectada”, “porosidade interconectada”, “porosidade não conectada”, “porosidade fechada” e “porosidade efetiva”. Montes e Haselbach (2006) destaca-se que nem todos os espaços porosos estão disponíveis para o escoamento e não são eficazes na condução de fluxos.

Zou e Malzbender (2016) veem “porosidade interconectada” e “porosidade aberta” como sinônimos. Zhong e Willie (2016) têm um entendimento semelhante: “porção volumétrica dos poros acessíveis é definida como porosidade efetiva aqui”. No entanto para Li et al. (2021), os poros acessíveis através da superfície da amostra que são “becos sem saída” devem ser contados como “porosidade aberta”, mas não como “porosidade interconectada”. Do mesmo modo, “porosidade não conectada” e “porosidade fechada” apresentam ao menos uma sutil diferença: enquanto “porosidade não conectada” se refere ao volume de poros que não permitem a um fluido atravessar um dado espécime e, portanto, inclui os poros “sem saída”, situados na face do espécime, a “porosidade fechada” costuma dizer respeito somente aos poros internos, não atingidos pelo escoamento na escala estudada (descarta-se aqui fenômenos de capilaridade e difusão, por exemplo).

Por sua vez, “porosidade efetiva” é o mais ambíguo dos termos. Conforme Hook (2003), em particular, o termo porosidade efetiva é amplamente utilizado, mas significa coisas diferentes para pessoas diferentes. Não há consenso sobre sua definição. Neithalath *et al.* (2006), - cujo método foi empregado - utilizou o termo “porosidade interconectada”. No entanto, eles o chamaram de “porosidade efetiva” em

um trabalho posterior (NEITHALATH *et al.*, 2010). Zhang *et al.* (2018) estabelecem essa mesma relação sinônima quando afirmam que “[os] poros conectados, também chamados de poros efetivos, são funcionais no transporte de água através dos materiais”. Ong, Jagadeesh e Su (2020) optou por redundância; embora não utilizem a metodologia de Neithalath *et al.* (2006), eles designam por “porosidade interconectada efetiva” a quantidade avaliada em seu estudo.

Sendo assim, (semelhante ao de Zhang *et al.*, (2018), mas não o mesmo), a efetividade de algo está atrelada a um uso, a sua finalidade, neste caso, a capacidade do concreto permeável veicular vazão, isto é, de sediar escoamento. Assim, ao relacionar a noção de efetividade à de utilidade (escoamento), entende-se que “porosidade efetiva” seja aquela percebida pelo fluxo de um determinado fluido. Dessa forma, não é garantido que “porosidade efetiva” seja sinônimo de “porosidade interconectada”, a menos que redefinições, comumente notadas na literatura, busque explicá-las com o mesmo significado, atribuindo o mesmo sentido físico para nomenclaturas diferentes, como definida por Wimberley, Leming e Nunez (2001), Zhang *et al.* (2018) e Ong, Jagadeesh e Su (2020). Segundo Lofrano *et al.* (2020), o escoamento em um meio poroso se processa, preferencialmente, pelos caminhos de menor resistência. Isso quer dizer que o fluido não atravessa, necessariamente, todo o espaço poroso interconectado. Assim como parcelas do espaço poroso interconectado podem estar preenchidas por um outro fluido (e.g. bolhas de ar aprisionadas). Sendo assim, essa parcela do espaço poroso não colaborará com o escoamento.

Desse modo, no atual estado da arte, a única maneira de se avaliar “porosidade efetiva” segundo essa definição seria por um método indireto, através de ensaios de permeabilidade, de modo que ela funcionaria como um fator de ajuste. Embora a maioria dos estudos na literatura não identifiquem características da rede de poros que podem afetar a permeabilidade experimental, e pelas imprecisões experimentais devido a inadequação metodológica complexa que retratam a dificuldade de padronização de um teste para avaliação da porosidade efetiva (ONG; JAGADEESH; SU, 2020), optou-se por utilizar o termo “porosidade efetiva”, por ser, dentre as outras nomenclaturas, a que mais traz significado físico quando levado em consideração o escoamento. Desse modo, define-se genericamente como porosidade “isolada” todos vazios que não contribuem para o escoamento, sendo o somatório da “porosidade

fechada” e da “porosidade não conectada” e que podem ser obtidos pela diferença entre a P_t (normalizada) e a P_e (não normalizada).

Ainda que técnicas de tomografia computadorizada sejam empregadas para definição da “porosidade efetiva”, no entanto Cosic *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2018), Chandrappa *et al.* (2018), Ong, Jagadeesh e Su (2020) observam erros percentuais entre os resultados de porosidades experimentais e numérico computacionais.

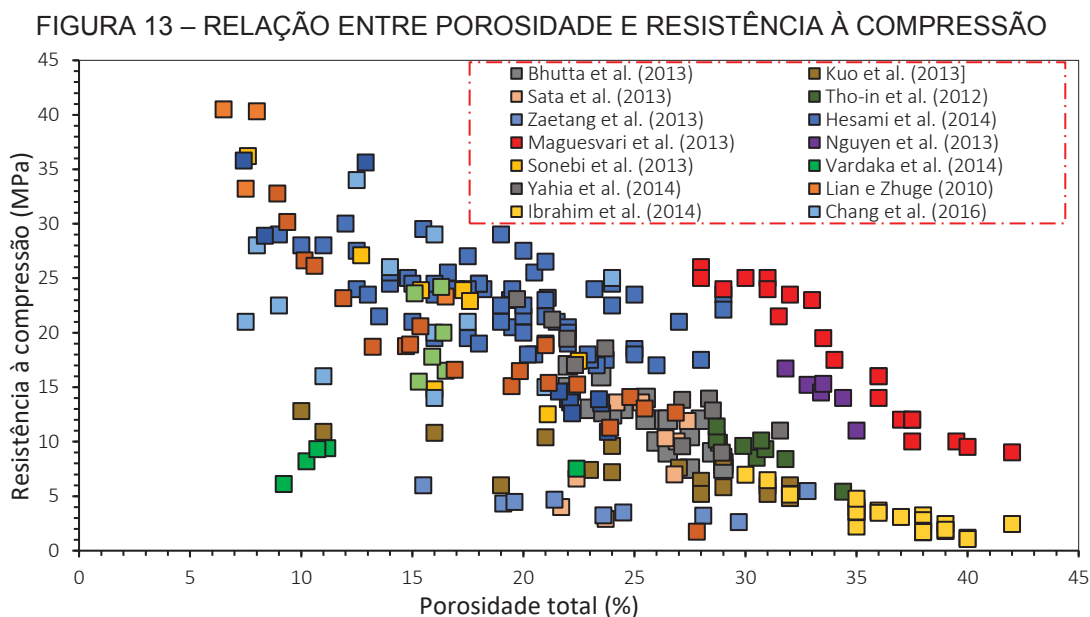
2.5.2 Resistência mecânica

Dependendo da aplicação, o desempenho mecânico pode ser uma propriedade decisiva para viabilidade de um determinado traço de concreto permeável. Destaca-se que o concreto permeável geralmente não é utilizado para pavimentos com alta solicitação de tráfego, devido à baixa resistência mecânica relacionada com a elevada porosidade (FERGUSON, 2005; HAGER, 2009; SABNIS, 2012; JIANG; XIAO, 2019).

A resistência à compressão é determinada através do rompimento de corpos de prova cilíndricos conforme estabelece a ASTM C39 (2015) e ABNT NBR 5739 (2007). A ABNT NBR 16416 (2015) aborda diferentes métodos de ensaios para determinar a resistência mecânica de pavimentos permeáveis de acordo com o tipo de revestimento: peça de concreto permeável (ABNT NBR 9781:2013); placa de concreto permeável (ABNT NBR 15805:2015); e concreto permeável moldado *in loco* (ABNT NBR 12142:2010).

Segundo a ABNT NBR 16416 (2015), o bloco intertravado (*paver*) de concreto permeável deve ter resistência à compressão de 20 MPa, a placa de concreto permeável deve ter resistência à flexão de 2 MPa e o concreto permeável moldado *in loco* deve atingir uma resistência à tração por flexão de 1 MPa para pedestre e de 2 MPa para tráfego leve de veículos. Segundo Hager (2009 apud KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017), os pavimentos com tráfego de veículos requerem resistências à compressão superiores a 20,7 MPa, sendo que estes são geralmente limitados pelo uso pouco frequente e a baixa velocidade.

Na Figura 13 pode ser observado a relação entre a porosidade total e resistência à compressão, a partir de resultados extraídos da literatura.



Nota-se que o comportamento predominante reflete maiores resistências para as menores porosidades. O concreto permeável pode alcançar resistência à compressão mais elevada (> 25 MPa) a partir de uma dosagem bem definida e com a aplicação de uma compactação eficiente, além do uso de adições e aditivos (LIAN; ZHUGE, 2010). No entanto, a alta resistência só é alcançada com uma redução na porosidade, o que pode implicar, consequentemente, na redução na permeabilidade (BHUTTA *et al.*, 2013).

Kia, Wong e Cheeseman (2017) retratam que a resistência à compressão diminui, em média, cerca de 3% para cada aumento de 1% no volume de poros. Por outro lado, Neithalath e Deo (2011) verificaram que um aumento no volume de poros em cerca de 10% resulta numa redução da resistência à compressão de aproximadamente 50%.

2.5.3 Velocidade de onda ultrassônica

O método do ultrassom é um ensaio não destrutivo relevante para caracterização e investigação do concreto convencional (OHDAIRA; MASUZAWA, 2000; SOLÍS-CARCAÑO; MORENO, 2003; BOGAS; GOMES; GOMES, 2013; CARRIÓN *et al.*, 2017).

As normas para determinação da velocidade do pulso ultrassônico (VPU) no concreto são: ASTM C 597 (2016): Método para determinar velocidade do pulso

ultrassônico do concreto e pela ABNT NBR 8802 (2013): Concreto no estado endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Utiliza-se o método VPU na indústria do concreto por mais da metade um século, sendo aplicável na determinação da densidade do concreto, resistência, módulo dinâmico de elasticidade, homogeneidade, durabilidade, profundidade de superfície rachaduras e outras propriedades (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2016), sendo um ensaio flexível, altamente sensível, portátil, não perigoso, com alta taxa de amostragem e custo acessível (AZHARI, 2010).

A relação entre VPU e a resistência à compressão não é única, uma vez que é influenciada por fatores como tipo e tamanho do agregado, propriedades físicas da pasta de cimento, condições de cura, composição da mistura, idade do concreto e teor de umidade (TRTNIK; KAVCIC; TURK, 2009).

Bogas, Gomes e Gomes (2013) testaram 208 CPs de concreto convencional e obteve uma variação na VPU entre 3500 e 5200 m/s para uma resistência à compressão de 30 e 80 MPa, respectivamente, representada pela regressão descrita pela Equação 4, com uma correlação (R^2) de 0,61.

$$f_c = 3,38 \cdot e^{0,62 \cdot UPV} \quad (4)$$

Por outro lado, quando Bogas, Gomes e Gomes (2013) consideraram a influência dos materiais constituintes, e que deve ser analisada separadamente, nota-se um aumento expressivo da correlação (R^2) para 0,88, como pode ser observado através da Equação 5. Neste caso, segregou-se os dados para um mesmo tipo de agregado e retrataram, como esperado, que quando as diferentes composições, tipos de agregados, idade de ensaio são considerados simultaneamente, existe uma fraca correlação entre VPU e a resistência à compressão.

$$f_c = 0,023 \cdot e^{1,6 \cdot UPV} \quad (5)$$

Tomando o concreto como um material composto de duas fases, supõem-se que a velocidade de pulso ultrassônico no concreto, $VPUC$, esteja relacionada à velocidade ultrassônica do agregado, VPU_{Ag} , e à velocidade ultrassônica da argamassa, VPU_{ar} . Trtnik, Kavcic e Turk (2009) propuseram um modelo, de acordo

com a Equação 6, onde V_{ag} e V_{ar} são, respectivamente, a porcentagem do volume dos agregados e da argamassa. Neste caso, apenas influência da zona de transição pasta/agregado é negligenciada.

$$\frac{1}{VPUC} = \frac{V_{ag}}{VPU_{Ag}} + \frac{V_{ar}}{VPU_{ar}} \quad (6)$$

Com base nos valores médios da VPU, obtidos em 28 dias, os autores registraram que, apenas na argamassa, a VPU_{ar} foi de 4500 m/s, e apenas para os agregados, a VPU_{ag} foi de 6300 m/s, estabelecendo-se a relação VPU_{ag} / VPU_{ar} , resultando na constante de 1,4, retratando que a velocidade de propagação no concreto é mais influenciada pelo volume de agregados.

Outra variável que deve ser considerada nos modelos é o tempo de cura do concreto. Ikpong (1993), Malhotra e Carino (2004), Liu *et al.* (2018) e Godinho *et al.* (2020) retratam que a VPU, assim como a resistência à compressão, aumenta consideravelmente com o tempo de cura, pois o meio fica mais densos, resultante da maior hidratação da pasta, com sua respectiva solidificação e menor o volume de vazios.

Liu *et al.* (2018) determinaram relações confiáveis entre a VPU, a porosidade e a resistência à compressão do concreto leve. Estes autores obtiveram diferentes equações empíricas em função da idade de cura, 7, 14, e 28 dias, com maior velocidade para o maior tempo de cura. E destacam que a determinação da VPU deve ser combinada com outros ensaios não destrutivos, pois seus valores dependem de inúmeros fatores, como a composição do concreto e seu proporcionamento, a idade do concreto e, além disso, da presença “falhas” em seu interior, que podem não afetar necessariamente o desempenho do mecânico na mesma proporção que poderiam afetar a magnitude da VPU.

Lafhaj *et al.* (2006) verificaram a influência da porosidade na VPU para argamassas com diferentes relações a/c, e obtiveram a regressão exponencial descrita pela Equação 7, sendo o coeficiente de ajuste, α' , retratado pela Equação 8, relacionado as características físicas dos materiais constituintes, não isoladamente, que influenciariam na propagação da onda ultrassônica. Apenas das contribuições

inegáveis, este modelo não tem robustez e correspondente aos critérios traçados apenas neste experimento.

$$VPU = VPU_0 \cdot (1 - P)^{a'} \quad (7)$$

$$a': \frac{(c - 1)}{2} \quad (8)$$

Onde:

VPU_0 : VPU quando a porosidade é zero;

P : porosidade (%);

c : *parametro de ajuste empirico*

Além disso, nota-se que a correlação exponencial estabelecida entre a VPU e a P é fundamentada em uma situação considerada ideal, onde a VPU_0 é uma constante com valor máximo para quando a porosidade inexiste no corpo de prova, sendo um dado exclusivo para esse traço.

Na mesma linha de pesquisa, Lafhaj *et al.* (2006) verificaram que para as maiores porosidades na argamassa, menores seriam as $VPUs$, com uma redução da velocidade de 15% para um aumento de 5,5% na porosidade. Destaca-se também que para porosidades superiores a 12%, a atenuação exibe um aumento acentuado, que pode estar relacionado à dispersão da onda ultrassônica por poros de tamanho crescente, inviabilizando a confiabilidade dos resultados. Naffa *et al.* (2002) e Zhu *et al.* (2011) também verificaram que o aumento da porosidade diminui a VPU , em função da atenuação da onda de propagação.

Em relação a aparelhagem do ultrassom, Benouis e Grini (2011) verificaram diferentes $VPUs$ quando utilizados transdutores de diferentes diâmetros, 7,5 e 49,5 mm, com uma leitura mais alta, correspondente a 1,7 vezes, para o maior transdutor. Neste estudo, concluíram que as porosidades podem ser previstas com VPU como variável independente, para concretos produzidos com relação $a/c \geq 0,5$, a partir de uma correlação linear, descritas pelas Equações 9 e 10, para o transdutor de 7,5 e 49,5 mm, respectivamente.

$$P = -0,007 \cdot VPU + 30,12 \quad (9)$$

$$P = -0,005 \cdot VPU + 33,18 \quad (10)$$

Por outro lado, Benouis e Grini (2011) relatam que em concretos com uma relação a/c inferior a 0,5, onde há maior volume de poros, nota-se maior dispersão dos resultados, uma vez que a atenuação aumenta. Destaca-se que as regressões obtidas por esses autores foram de uma pequena campanha experimental, e este comportamento linear é distinto de outros autores. Além disso, nota-se que a indireta associação entre a relação a/c com a VPU não é conclusiva para caracterizar seu comportamento, pois além dela, o volume de pasta, dimensão e tipo de agregado também podem influenciar nos resultados.

Hernandez *et al.* (2006a) e Hernandez *et al.* (2006b) determinaram a VPU em argamassas de diferentes composições, variando as relações areia/cimento, relações a/c e tipo de cimento. Verificaram que um aumento na rigidez da matriz, independente da porosidade, promove um aumento da VPU. Também foi verificado que um aumento na fração volumétrica de areia induz a um aumento da velocidade, onde um CP com porosidade constante de 20%, a VPU variou de 3350 para 3950 m/s, apenas alterando o teor de areia em relação ao cimento de 30 a 60%.

Este item buscou estudos com foco nas correlações entre a VPU e a variação da porosidade. Nota-se campanhas experimentais com delimitações e especificidades, cada uma obtendo o comportamento correspondente aos materiais utilizados. Normalmente, a porosidade no concreto convencional é uma característica não desejada, seja com micro ou macroporos, podendo ser considerada desde uma falha com consequências estruturais, ou como um canal de transmissão de agentes agressivos, refletindo em patologias na estrutura de concreto. Desse modo, identificou-se que poucas pesquisas buscam estabelecer critérios técnicos para estimar a macroporosidade do concreto convencional a partir da VPU, tendo seus primeiros passos na elaboração de argamassa e concretos leves.

Em relação ao concreto permeável, que possui, intencionalmente, uma macroporosidade interconectada, existem ainda menos pesquisas, e consequentemente, falta de definições e modelos de previsão, mas nota-se um crescente nos últimos anos, que são discutidas a seguir, permitindo verificar as primeiras abordagens e as respectivas interpretações.

Como verificado no concreto convencional, a determinação da VPU é influenciada por diversos aspectos. Em relação a composição do concreto permeável, Cosic *et al.* (2015) verificaram os tipos de agregados utilizados, - dolomita e escória de alto forno – em função da sua massa específica, resultaram em diferentes módulos de elasticidade, sendo maiores que 51 GPa e 38 GPa, respectivamente.

Chandrappa e Biligiri (2017) verificaram a influência da porosidade do concreto permeável na atenuação da onda ultrassônica, destacando o quão importante é o controle de sensibilidade do instrumento, que ajusta o parâmetro de ganho (correspondente ao fator de amplificação) conforme necessário para cada ensaio, e especificado pela ASTM E1316-14 (2014). Nesta pesquisa, Chandrappa e Biligiri (2017) consideraram diferentes parâmetros de ganho, com 30, 40, 50 e 60 decibéis, correspondentes ao fator de amplificação de 30, 100, 300 e 1000, respectivamente, a fim de determinar o ganho apropriado para medições confiáveis da VPU. Desse modo, o fator de amplificação necessário para medição resultou na faixa de 300 a 1000 (entre 50 e 60 dB), uma vez que utilizando fatores menores a chegada do pulso não foi detectada com precisão. Nestas leituras foram utilizadas pares de transdutores de 55 kHz, com 42 mm de diâmetro.

Chandrappa e Biligiri (2016c) constataram que para uma maior densidade do concreto permeável (consequentemente, menor porosidade), maior será a VPU. Para as amostras analisadas, os valores de VPU variaram entre 2750 até 3400 m/s para um intervalo de aproximadamente 8% na porosidade (diminuindo de 39 para 31%, respectivamente). Ainda ressaltam a viabilidade na utilização do método de ultrassom para realizar avaliações periódicas nos pavimentos de concreto permeável, preservando-o da necessidade da extração de testemunho, o que lhe causaria perturbações na estrutura porosa.

Além disso, Chandrappa e Biligiri (2016c) destacam que o fato da superfície da amostra do concreto permeável ser normalmente irregular, devido ao acabamento superficial relacionado a baixa relação pasta/agregado, pode ser aplicada uma camada espessa de gel entre a superfície e o transdutor antes de realizar as medições.

Amini *et al.* (2018) obtiveram maiores VPU para menores porosidades, menores coeficientes de permeabilidade (Darcy) e maiores resistências à compressão. Os valores de VPU variaram entre 2700 até 3600 m/s para um intervalo de aproximadamente 15% na porosidade. A partir dos resultados obtidos, os autores

confirmam que o método oferece uma técnica de avaliação rápida das propriedades do concreto permeável aplicado *in loco*.

Martins Filho *et al.* (2020) retratam que a aplicação do Método do Ultrassom merece atenção especial para caracterização do concreto permeável, com carência de pesquisas e com potencial de desenvolver modelos analíticos de previsão das propriedades. No entanto, destaca-se que a alta porosidade do concreto provoca atenuação da onda ultrassônica, necessitando delimitar intervalos de porosidade para uma leitura confiável. A VPU variou de 3642 até 4262 m/s para uma redução de aproximadamente 12% na porosidade (de 30 para 18%, respectivamente), com alta correlação entre os resultados.

Ridengaoqier e Shigemitsu Hatanaka (2021) verificaram que a VPU tende a diminuir para as maiores porosidades, e aumentar para as misturas com agregados de maiores diâmetros, ainda que mantendo a porosidade. Segundo Ridengaoqier *et al.* (2018) a principal razão considerada para o efeito das dimensões dos agregados é que o fator predominante na VPU é o comprimento do caminho mínimo da propagação da onda dentro do CP. Ridengaoqier e Shigemitsu Hatanaka (2021) observaram que a estrutura interna se torna-se mais homogênea ao utilizar britas de menores diâmetros, enquanto se torna mais heterogênea ao usar brita de maiores diâmetros, de modo que nesta o caminho da onda ultrassônica se torne menor.

2.6 PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL

Neste item, as propriedades hidrodinâmicas do concreto permeável são analisadas sob diferentes perspectivas, com base no atual estado da arte, utilizando-se de uma abordagem darciana (escoamento linear), e a partir de fundamentos da mecânica dos fluidos em meios porosos, com base em escoamentos não lineares, considerando definições do regime de escoamento e parâmetros hidráulicos possíveis de caracterizá-lo. Além disso, são destacados procedimentos laboratoriais para determinar o escoamento do fluido em concreto permeável.

2.6.1 Escoamento no concreto permeável: abordagem darciana

A permeabilidade intrínseca, em um amplo sentido, é uma característica relacionada ao meio poroso em permitir a percolação de um determinado fluido

através dos poros, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo “coeficiente de permeabilidade”, $K (L \cdot T^{-1})$, que também é denominado de “condutividade hidráulica” (CAPUTO, 1988). Essa abordagem generalizante foi possível após as definições atribuídas por Nutting (1930), onde a permeabilidade intrínseca, $k (L^2)$, diretamente relacionado a K , pode ser obtida através da Equação 11, onde $\rho (M \cdot L^{-3})$ é a massa específica do fluido, μ é sua viscosidade dinâmica ($M \cdot T^{-1} \cdot L^{-1}$) e g é a aceleração gravitacional ($M \cdot T^{-2}$). Como vantagem sobre K , k não depende das características do fluido (e, conseqüentemente, da temperatura); pode ser expresso em função apenas dos parâmetros geométricos do espaço poroso, $k = cd^2$, em que c é uma constante geométrica do meio poroso e $d (L)$ é um comprimento característico médio do meio poroso. Deve-se notar que como k possui unidade de comprimento (L^2), é conveniente apresentar o valor da raiz da permeabilidade intrínseca, ou seja, \sqrt{k} , em (L).

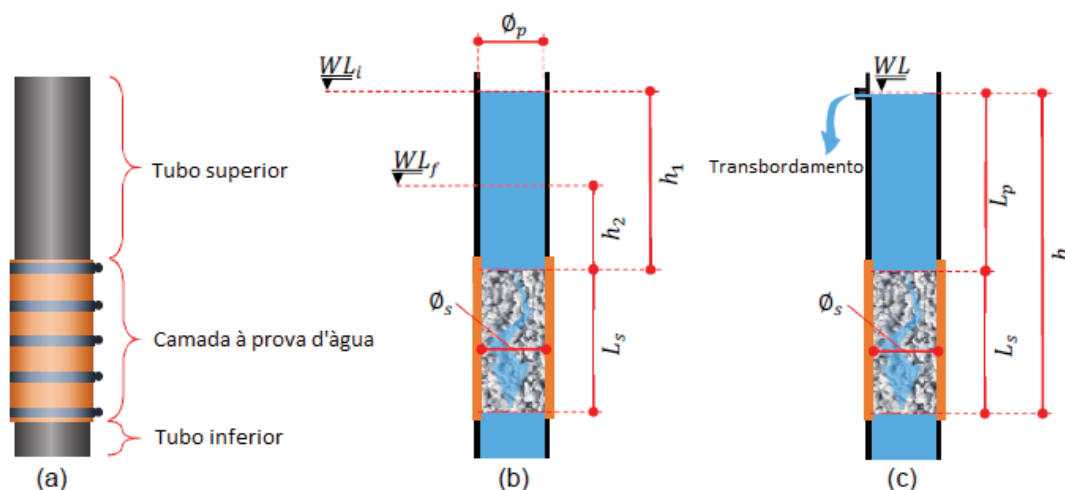
$$k = K \cdot \frac{\mu}{\rho \cdot g} \quad (11)$$

Desse modo, entende-se que a permeabilidade intrínseca é uma característica desassociada ao tipo do fluido, intrínseca ao meio poroso, enquanto o coeficiente de permeabilidade, ou condutividade hidráulica, está associada ao meio poroso e ao tipo do fluido. Usualmente nos artigos relacionados as propriedades do concreto permeável, as expressões permeabilidade e coeficiente de permeabilidade se confundem, e na maioria dos casos é designado o termo permeabilidade em referência à propriedade de escoamento do fluido no meio poroso. Neste sentido, de modo a padronizar e promover o correto entendimento, nesta tese será sempre utilizado o termo “coeficiente de permeabilidade” para referir-se a propriedade dependente do meio poroso e do fluido, expressa em unidade de comprimento dividida por unidade de tempo (e. g. m/s ou cm/s), e o termo “permeabilidade intrínseca” para referir-se exclusivamente as propriedades físicas do meio poroso, sendo a expressão “ensaio de permeabilidade” para designar a metodologia adotada para obter o coeficiente de permeabilidade.

2.6.1.1 Ensaio de permeabilidade em laboratório

Destaca-se que atualmente não há uma normativa que regulamente o procedimento para caracterizar o escoamento do fluido no concreto permeável em laboratório. No entanto, na literatura são usualmente utilizados os permeâmetros de carga variável (Figura 14b) ou carga constante (Figura 14c) como equipamento de ensaio. Para alguns pesquisadores (THO-IN *et al.*, 2012; SATA; WONGSA; CHINDAPRASIRT, 2013; ZAETANG *et al.*, 2013; BHUTTA *et al.*, 2013; KUO; LIU; SU, 2013; IBRAHIM *et al.*, 2014; DAN *et al.*, 2016; PIERALISI; CAVALARO; AGUADO, 2017; SANDOVAL *et al.*, 2017; KIM; GADDAFI; YOSHITAKE, 2016; HATANAKA *et al.*, 2019; MARTINS FILHO *et al.*, 2020; SANDOVAL *et al.*, 2020; LEDERLE *et al.*, 2020) o ensaio de permeabilidade deve ser realizado com permeâmetro de carga constante para conjuntos granulares com alta porosidade e alta permeabilidade. Por outro lado, para Neithalath *et al.* (2003), Yahia e Kabagire (2014), Nguyen *et al.* (2014) e Costa *et al.* (2018), dependendo da porosidade e da permeabilidade, o ensaio também pode ser realizado utilizando permeâmetro de carga variável.

FIGURA 14 – ESQUEMA DO PERMEÂMETRO (A) UTILIZADO PARA O ENSAIO DE CARGA VARIÁVEL (B) E DE CARGA CONSTANTE (C)



FONTE: Adaptado Pieralisi (2016).

O equipamento para os dois tipos de ensaios é semelhante, composto por 3 partes (FIGURA 14a): tubo superior, camadas à prova d'água e tubo inferior. O tubo superior é colocado acima da amostra, e pode ser usado para controlar o nível de água inicial e final. As camadas à prova de água são colocadas ao redor da amostra

para impedir o fluxo de água na lateral do CP durante o teste e garantir estanqueidade. Finalmente, o tubo inferior é posicionado abaixo da amostra com uma saída para controlar o fluxo de água.

Para os dois métodos de avaliação do escoamento, o coeficiente de permeabilidade é tratado predominantemente pela Lei de Darcy, como verificado no estado da arte. Os dados necessários para calcular o coeficiente de permeabilidade, nos dois tipos de permeâmetro, é basicamente o volume de água que passa através da amostra em um determinado intervalo de tempo, no entanto os procedimentos de ensaio são diferentes e adaptados para cada condição de carga, descritas abaixo.

Permeâmetro de carga variável

Na Figura 14b pode ser observado o permeâmetro de carga variável. Este teste é realizado com as seguintes etapas:

- Primeiro, a extremidade do tubo inferior está fechada;
- Em seguida, o sistema é preenchido com água até atingir o nível de água inicial (WL_i) e o tubo inferior é aberto;
- Finalmente, o tempo necessário (Δt) para a água atingir o nível final da água (WL_f) é medido.

A Equação 12 apresenta a equação de previsão do coeficiente de permeabilidade (K), obtida pela Lei de Darcy e adequada para o permeâmetro de carga variável.

$$K = \frac{\phi_p^2 \cdot L_s}{\phi_s^2 \cdot \Delta t} \cdot \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (12)$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade (m/s);

ϕ_p^2 = diâmetro interno do tubo (m);

L_s = altura do CP (m);

h = distância entre a parte inferior do CP e o nível de água (m);

h_i = distância entre a parte superior do CP e o nível de água inicial (m);

h_f = distância entre a parte superior do CP e o nível de água final (m);

Δt = intervalo de tempo (s);

\emptyset_s = diâmetro do CP (m).

Permeâmetro de carga constante

Na Figura 14c pode ser observado o permeâmetro de carga constante, o ensaio deve ser realizado seguindo as seguintes etapas:

- Primeiro, a extremidade do tubo inferior deve ser fechada;
- Em seguida, o volume de água necessário para encher o tubo inferior e os espaços dos poros da amostra é medido (q_1);
- Em seguida, o sistema deve ser preenchido com água até atingir o nível da água (WL) e o tubo inferior deve ser aberto;
- Finalmente, o volume de água (q_2) que passou pelo espécime em um determinado intervalo do tempo (t) é medido.

A Equação 13 apresenta a previsão do coeficiente de permeabilidade utilizando a Lei de Darcy adaptada para permeâmetro de carga constante.

$$K = \frac{4 \cdot q \cdot L_s}{\pi \cdot \emptyset_s^2 \cdot h \cdot t} \quad (13)$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade (m/s);

q = diferença entre q_2 e q_1 (m^3);

L_s = altura do CP (m);

h = distância entre a parte inferior do CP e o nível de água (m);

Δt = intervalo de tempo (s);

\emptyset_s = diâmetro do CP (m).

2.6.1.2 Ensaios de permeabilidade *in loco*

A ABNT NBR 16416 (2015), assim como a ASTM C1701 (2017), apresenta o procedimento do ensaio de permeabilidade para pavimentos permeáveis utilizando o anel de infiltração. Para realização do ensaio, o anel de infiltração deve ser

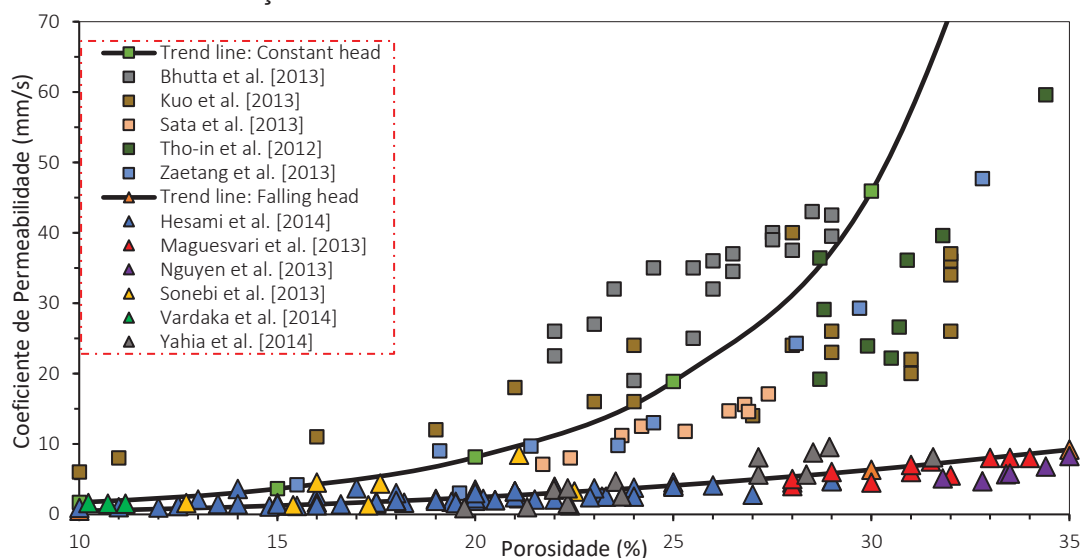
posicionado no local e vedado na parte em contato com o pavimento, com massa de calafetar e/ou silicone, a fim de impedir vazamentos. Deve-se iniciar o ensaio em até 2 min após realizar uma pré-molhagem, com o lançamento de água suficiente (3,6 litros) para manter o nível entre duas marcações no anel, 10 mm e 15 mm. Assim, marcar o intervalo de tempo desde o lançamento da água, quando atingir a superfície do pavimento, até quando não houver mais água. Posteriormente, os dados obtidos são utilizados para calcular o coeficiente de permeabilidade.

Segundo Valério *et al.* (2018), atualmente existe uma busca por métodos mais precisos e confiáveis para medir a permeabilidade de pavimentos permeáveis do que o proposto pela ASTM C1701 (2017). Pode-se encontrar na literatura outros métodos de estimar a permeabilidade dos pavimentos permeáveis, como o descrito pela ASTM D3385-18 (2018) através do permeâmetro de anel duplo para solos; por Nichols *et al.* (2014) que propuseram um simulador de chuva; Cooley (1999) propôs o uso do permeâmetro NCAT de carga variável. Destaca-se a revisão realizada por Valério *et al.* (2018), que demonstra a variabilidade de resultados de permeabilidade fornecidos pelos diferentes dispositivos de ensaio.

2.6.1.3 Relação entre coeficiente de permeabilidade e porosidade

Normalmente, o coeficiente de permeabilidade é apresentado relacionando-se com a porosidade. Essa relação pode ser observada na Figura 15 a partir de resultados extraídos da literatura por Pieralisi (2016). Verifica-se que os resultados ficaram separados em dois grupos relacionados ao método de ensaio utilizado para a caracterização da permeabilidade: permeâmetro de carga constante (representados com marcadores quadrados); e permeâmetro de carga variável (representados com marcadores triangulares).

FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E POROSIDADE



FONTE: Adaptado de Perialisi (2016).

Como esperado, nota-se que o aumento da porosidade resulta em um maior coeficiente de permeabilidade, no entanto, os coeficientes de permeabilidade obtidos em permeâmetro de carga constante foram maiores que os obtidos com permeâmetro de carga variável, o que denota alguma inconsistência metodológica para caracterização do escoamento. Segundo Qin *et al.* (2015) e Chandrappa e Biligiri (2016b), a diferença nos resultados desses dois métodos está relacionada à pressão da água aplicada na face superior do CP. O permeâmetro de carga constante tem uma pressão constante aplicada na face superior ao longo da duração total do ensaio. Já a pressão aplicada na face superior do permeâmetro de carga variável apresenta uma redução ao longo do tempo de execução do ensaio.

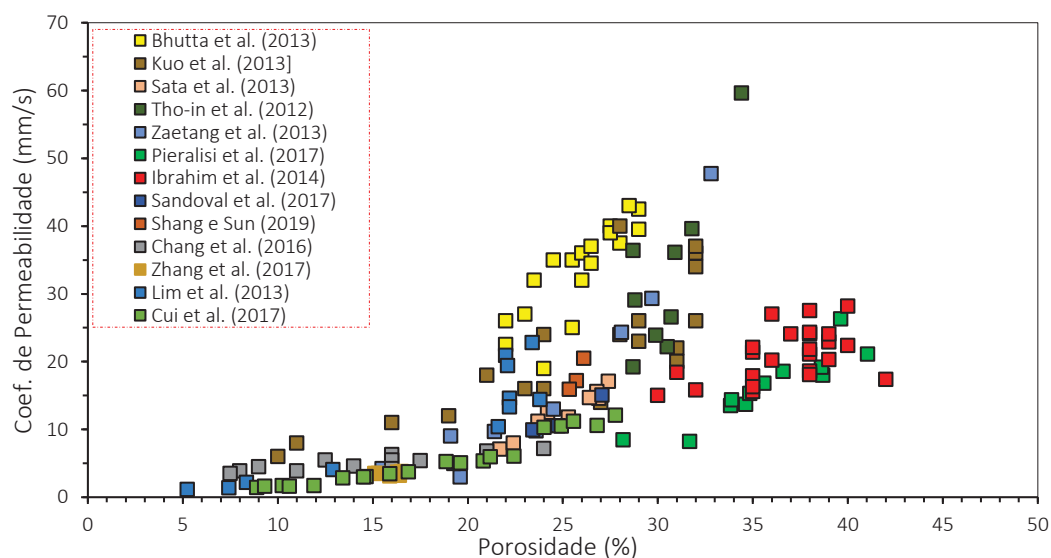
Na pesquisa desenvolvida por Sandoval *et al.* (2017), o comportamento foi semelhante, com resultados superiores para o coeficiente de permeabilidade obtido em permeâmetro de carga constante. Além disso, os resultados retratam que os ensaios de permeabilidade em permeâmetro de carga variável não conseguem detectar diferenças significativas entre as porosidades estudadas. Nesse sentido, os autores concluem que os resultados de permeabilidade obtidos em permeâmetro de carga variável não avaliam o alto potencial hidráulico que o concreto permeável realmente apresenta. Por outro lado, a permeabilidade obtida com permeâmetro de carga constante é capaz de detectar essa diferença, com uma vantagem potencial para sua caracterização, com resultados mais expressivos para as diferentes porosidades.

Além disso, uma reflexão merece ser discutida: a dedução do coeficiente de permeabilidade a partir de um ensaio requer alguma tratativa sobre o regime de escoamento. No entanto, nota-se que não foi abordado na literatura, no caso de permeâmetros de carga variável, a possibilidade de que haja uma transição de um regime turbulento (início do ensaio, maior carga), para um regime darciano. Sendo assim, como o equacionamento (modelo linear) utilizado não prevê essa situação, tal fato pode explicar as divergências entre ensaios a carga constante e a carga variável.

Ainda assim, nota-se uma grande variação nos resultados do coeficiente de permeabilidade em relação a uma determinada porosidade, como pode ser observado na Figura 16, que apresenta os resultados obtidos apenas em permeâmetros de carga constante.

Alguns pesquisadores começaram a buscar meios de explicar tal variabilidade, como Chandrappa e Biligiri (2016a), que relatam a influência das características do permeâmetro utilizado (e.g. altura de carga), proporcionamento dos materiais, assim como o formato e granulometria dos agregados, que necessitam de maiores investigações. A partir disso, questões fundamentais sobre o escoamento do fluido no concreto permeável passaram a não ser mais respondidas, justificando grande parte do desenvolvimento desta tese.

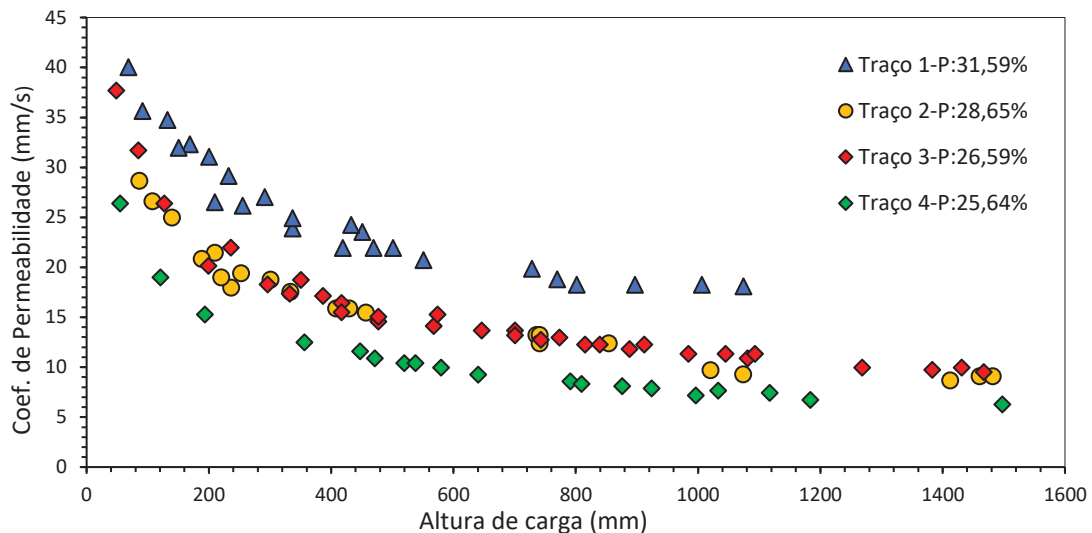
FIGURA 16 – RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: PERMEÂMENTO DE CARGA CONSTANTE



Na Figura 17 pode ser observado a influência da altura de carga, ou carga hidráulica, no coeficiente de permeabilidade do concreto permeável, a partir de

considerações da Lei de Darcy. Estes dados foram extraídos da pesquisa desenvolvida por Qin *et al.* (2015), que caracterizaram quatro traços, através do permeâmetro de carga constante, variando a altura de carga de 50 mm até 1500 mm.

FIGURA 17 – RELAÇÃO ENTRE A ALTURA DE CARGA E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE



FONTE: Adaptado QIN *et al.* (2015).

Segundo os dados extraídos de Qin *et al.* (2015), quanto maior a altura de carga, menor o coeficiente de permeabilidade. Chandrappa e Biligiri (2016a) explicaram esse fenômeno, retratando que a Lei de Darcy negligencia os efeitos inerciais e de velocidade para o concreto permeável, onde a mudança do tamanho dos poros e sua tortuosidade dá origem a um fluxo turbulento. Destacam que devido a essa turbulência, a relação linear entre o coeficiente de permeabilidade e a altura de carga não é mais válida e, portanto, existe uma relação não-linear, tornando o coeficiente de permeabilidade diferente para o mesmo CP e dependente da carga hidráulica, com menores coeficientes à medida que a carga hidráulica aumenta.

Não se questiona o valor da contribuição de Chandrappa e Biligiri (2016a) para o estado do conhecimento, contudo ainda utilizam conceitos sem fundamentos na mecânica dos fluidos, aplicando equações não lineares e potenciais, para ajustar os dados entre coeficiente de permeabilidade, obtidos por Darcy, e o gradiente hidráulico. No entanto, estas equações não lineares poderiam ser utilizadas para descrever o próprio escoamento do fluido (velocidade e gradiente) para, assim, posteriormente, prosseguir com as interpretações do escoamento e estimativa do coeficiente de permeabilidade, que deve ser único e particular de cada meio poroso.

Destaca-se que a amplitude dos resultados de velocidade/gradiente obtidos por Qin *et al.* (2015) para um mesmo CP são de grande valia para investigação do escoamento no concreto permeável e permitiu, utilizando-se dos modelos matemáticos que melhor caracterizam o escoamento, obter ricas interpretações, e o direcionamento de que as características do escoamento no concreto permeável não são definidas quando obtidas a partir da equação linear de Darcy.

Neste sentido, considerando a hipótese de que escoamento fosse linear, a comparação direta de dados obtidos por diferentes laboratórios ainda poderia ter a ressalva de que os ensaios devam ter sido realizados com a mesma altura de carga. Pela falta de uniformidade da carga hidráulica utilizada nos ensaios, os dados do coeficiente de permeabilidade e porosidade apresentados pelos mais variados autores não são possíveis de retratar o escoamento do fluido no concreto permeável.

Na Tabela 3 foram elencadas equações empíricas e semi-analíticas utilizadas com frequência na literatura, para correlacionar o coeficiente de permeabilidade em função da porosidade. No entanto, estes autores utilizaram, predominantemente, considerações baseadas na Lei de Darcy para previsão do coeficiente de permeabilidade. Desse modo, estas equações não passam de ajustes em função da porosidade, não sendo possível explicitar, em seus coeficientes, as características do escoamento não linear em um meio poroso.

TABELA 3 – EQUAÇÕES PARA CORRELACIONAR A POROSIDADE COM O COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: ESTADO DA ARTE

Modelo	Equação	Autores
Linear	$k = m \cdot P + n$	Luck <i>et al.</i> (2006) Park <i>et al.</i> (2010) Bhutta <i>et al.</i> (2013) Nguyen <i>et al.</i> (2014) Akand, Yang e Gao (2016) Zhong <i>et al.</i> (2016) Khankhaje <i>et al.</i> (2016)
Potencial	$k = m \cdot P^n$	Ghafoori e Dutta (1995a) Lim <i>et al.</i> (2013) Sonebia <i>et al.</i> (2016) Chandrappa e Biligiri (2016a) Sandoval <i>et al.</i> (2017)
Exponencial	$k = me^{nP}$	Deo, Sumanasooriya e Neithalath (2010) Maguesvari e Narasimha (2013) Pieralisi (2016) Zaetang <i>et al.</i> (2013) Zaetang <i>et al.</i> (2016)
Kozeny-Carman	$k = m \frac{P^3}{(1 - P)^2}$	Montes e Haselbach (2006) Barnhouse e Srubar (2016) Chandrappa e Biligiri (2016) Cui <i>et al.</i> (2017) Debnath e Sarkar (2019)

Destaca-se que antes de se estabelecer relações entre o coeficiente de permeabilidade e a porosidade, como apresentado na tabela acima, dever-se-ia verificar qual o regime de escoamento do concreto permeável, para assim aplicar coerentes leis da física que regem a dinâmica do fluido nestes meios.

Neste sentido, o item a seguir traz maior investigação sobre o escoamento não linear em meios porosos, como o concreto permeável, descrevendo de modo cronológico do estado do conhecimento as contribuições que melhor auxiliarão na compreensão do estudo.

2.6.2 Escoamento em meios porosos: abordagem não darciana

O escoamento em meios porosos é de grande interesse em muitos campos da Ciência. A quantidade de empregos que se faz dos mais diversos meios porosos, assim como suas motivações pelas quais são estudados, é evidente, tornando ainda mais importante a correta caracterização do escoamento e dos parâmetros que os afetam (LOFRANO *et al.* 2020).

O escoamento do fluido no meio poroso começou a ser definido por Henry Darcy, em 1856, que estabeleceu a Lei de Darcy, descrita pela Equação 14, na qual Q (L^3/T), representa a vazão, Δh (L), representa a carga hidráulica e K (L/T), o coeficiente de permeabilidade.

$$Q = K \cdot \frac{\Delta h}{l} \cdot A \quad (14)$$

Podendo ser reescrita de modo mais abrangente através das variáveis velocidade do fluido, q (L/T), e gradiente hidráulico, i (L/L), Equação 15. Nota-se que a relação estabelecida entre a velocidade do fluido e o gradiente hidráulico é linear, ou seja, há uma proporcionalidade, expressa pelo coeficiente de permeabilidade, K , que permanece constante independentemente das diferentes cargas hidráulicas aplicadas, sendo única para o meio poroso.

$$q = K \cdot i \quad (15)$$

Em 1940, M. King Hubbert (1903–1989) da Shell Oil Company publicou “*The theory of ground-water motion*” (Hubbert, 1940), onde abordou conceitos teóricos sob a equação de Darcy, deixando, assim, de ser empírica. Lofrano (2018) faz uma excelente tradução sobre o resumo do trabalho de Hubbert (1940), em que apresenta a transição do estado do conhecimento sobre a dinâmica dos fluidos em meios porosos, e deixa claro em que momento a semelhança observada por Darcy (1857) se restringia ao regime de baixas velocidades, com comportamento linear.

Os tratamentos analíticos existentes para o fluxo de águas subterrâneas têm sido quase sempre fundamentados sobre a concepção errônea, emprestada da teoria hidrodinâmica clássica de escoamento de fluidos ideias sem atrito, de que o movimento da água subterrânea é derivável a partir de um potencial de velocidade (Slichter, 1899). Esta concepção está em conformidade com o princípio da conservação de massa [princípio da continuidade], mas não com o da conservação de energia. No presente trabalho, demonstra-se que uma teoria analítica sujeita a menos exceções surge caso uma função potencial, cujo valor em um dado ponto é definido como sendo igual ao trabalho requerido para se transformar uma unidade de massa do fluido de um estado arbitrário padrão no estado do ponto em questão, seja empregado [...]. Essa [função] é uma expressão da lei de Darcy e é física, assim como matematicamente, análoga à lei de Ohm para eletricidade e leva às mesmas deduções em situações análogas [...]. O restante deste trabalho é devotado à dedução das consequências da lei de Darcy como expressa, com particular atenção aos problemas práticos de hidrologia de águas subterrâneas (HUBBERT, 1940, p.785 apud LOFRANO, 2018).

Desse modo, estudiosos da área passaram a notar desvios de linearidade da Lei de Darcy, e iniciaram o desenvolvimento de equações não darcianas. Com isso, posteriormente, destaca-se Forchheimer (1901a e 1901b), que propôs uma lei empírica que envolvia adicionar um termo quadrático à Lei de Darcy, permitindo a interpretação de escoamentos não lineares, descrita através da Equação 16. De certo modo, esta equação é uma extensão da Lei de Darcy para velocidades elevadas, pois quando a velocidade diminui consideravelmente, o produto de $b \cdot q^2 \rightarrow 0$, e resulta na relação $a = i/q$, já mencionada na Equação 15. No entanto, a adição do coeficiente quadrático nesta equação permite identificar fatores até então considerados lineares e que não interviam na obtenção do coeficiente de permeabilidade.

$$i = a \cdot q + b \cdot q^2 \quad (16)$$

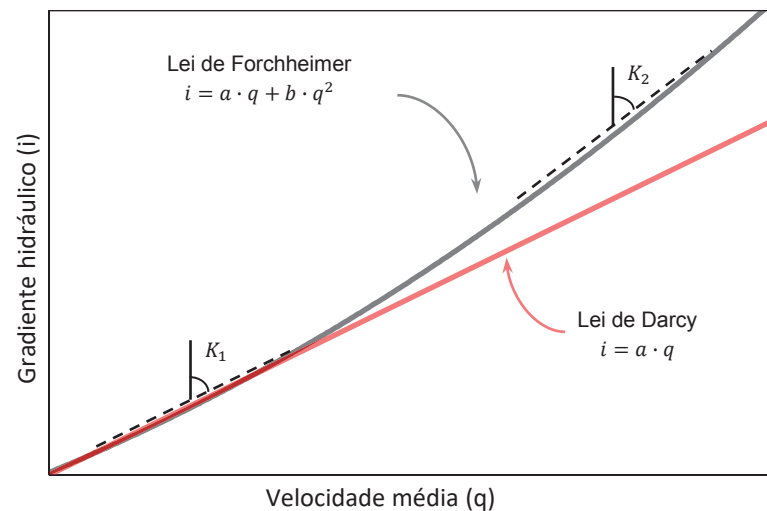
Onde:

$a = 1/K$:coeficiente linear de Forchheimer ($L^{-1}T$);

b : coeficiente quadrático de Forchheimer ($L^{-2}T^2$);.

Resumidamente, a Figura 18 retrata a relação abordada entre um regime com comportamento linear, pela Lei de Darcy, e outro regime não linear, representada pela equação de Forchheimer. Nota-se que para baixos gradientes/velocidades, a constante linear dos dois modelos é semelhante, no entanto, para maiores gradientes/velocidades, as constantes são distintas.

FIGURA 18 - COMPARAÇÃO DA LEI DE DARCY E DE FORCHHEIMER



Posteriormente, a Lei de Forchheimer foi abordada por outros pesquisadores a fim de lhe trazer um embasamento teórico. Merece destaque Ahmed e Sunada (1969), que a deduziram pelas equações de Navier-Stokes e determinaram os respectivos coeficientes da equação: $a = \left(\frac{\mu}{\rho \cdot g \cdot k}\right)$ e $b = \left(\frac{1}{g \cdot c \cdot d}\right)$, sendo expressa pela viscosidade dinâmica do fluido, μ ($Pa \cdot s$), massa específica, ρ (kg/m^3), aceleração gravitacional, g (m/s^2), coeficiente de permeabilidade intrínseco, k ($= c \cdot d^2$), (m^2), constante do meio poroso, c , e através do comprimento característico do meio poroso, d (m). Deste modo, a correlação destas variáveis pode ser reescrita de acordo com a Equação 17.

$$i = \frac{\mu}{\rho \cdot g \cdot k} \cdot q + \frac{1}{g \cdot c \cdot d} \cdot q^2 \quad (17)$$

Lofrano *et al.* (2020) destaca que há diversos modelos expressos por equações polinomiais do segundo grau que buscam relacionar o comportamento não linear do fluido no meio poroso. No entanto, essas formulações não passam, muitas vezes, de ajustes nos parâmetros a e b da equação de Forchheimer para problemas específicos. E que a última contribuição relevante foi a descrita acima, quando Ahmed e Sunada (1969) deduziu os coeficientes dessa equação com parâmetros referentes às características do fluido, do escoamento e do meio poroso.

2.6.2.1 Regimes de escoamento

A fim de determinar o comportamento do fluido durante seu escoamento, merece destaque o estudo elaborado por Reynolds (1883), que notou seu grau de perturbação e mensurou pela constante, Re , que descreve uma relação entre as forças inerciais e de viscosidade, permitindo caracteriza-lo pela Equação 18. O número de Reynolds é expressa pela velocidade média do fluido, q (m/s), diâmetro da tubulação, D (m), e pela viscosidade, ν (m^2/s).

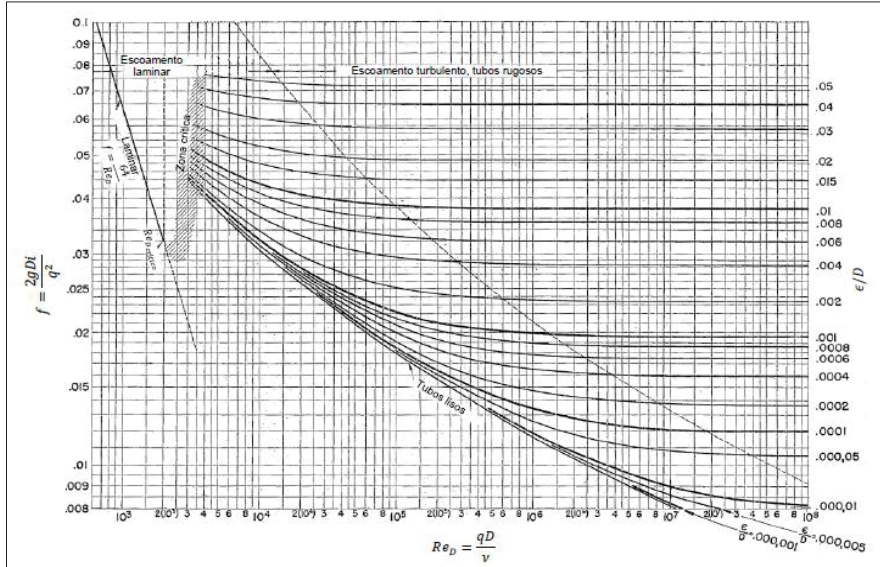
$$Re = \frac{q \cdot D}{\nu} \quad (18)$$

Posteriormente aos princípios formulados por Reynolds, Prandtl (1905) apresentou uma ideia revolucionária na mecânica dos fluidos, a Teoria da Camada Limite, que determina uma zona do escoamento que pode, ou não, ser influenciada pelas superfícies de contato, sendo distinguidos nas condições de hidraulicamente liso, transição e rugoso.

A partir desta teoria, iniciam-se as deduções analíticas do fator de atrito, f , com muitas pesquisas buscando correlacioná-lo com a constante Re , com diversas contribuições para mecânica dos fluidos, iniciando com pesquisas de Blasius (1913), até mais tarde, por Rouse (1943), que desenvolveu o então denominado “Diagrama de Rouse”, sendo considerado um grande salto na consolidação das leis de resistências do fluido. No entanto, o diagrama que se tornou referência na mecânica

dos fluidos foi de Moody, que, em 1944, publicou o projeto de Rouse com as variáveis f e Re_D nos eixos principais do diagrama, transformando-o em uma maneira simplificada de utilização, como pode ser observado na Figura 19.

FIGURA 19 - DIAGRAMA DE MOODY



FONTE: Adaptado de Moody (1944).

Posteriormente as deduções da Lei de Forchheimer pelas equações de Navier-Stokes (Equação 17), Lofrano *et al.* (2020) reformularam-na de forma que corresponda à estrutura da equação de Darcy-Weisbach, para tanto, os números adimensionais $Re_{\sqrt{k}}$ e $f_{\sqrt{k}}$ foram definidos, respectivamente, como o número de Reynolds para escoamento em meio poroso, Equação 19, e como o fator de resistência para fluxo através de meios porosos, Equação 20. Deve ser observado, na Equação 20, que $f_{\sqrt{k}}$ depende de dois termos adimensionais: $\frac{1}{Re_{\sqrt{k}}}$ e $\frac{d}{\sqrt{k}}$. Enquanto o primeiro, sendo o inverso da Equação 18, depende das características do fluido (ρ e μ) e do escoamento (q), o último se baseia apenas nos parâmetros d e \sqrt{k} , intrínsecos a heterogeneidade do meio poroso.

$$Re_{\sqrt{k}} = \frac{\rho \cdot q \cdot \sqrt{k}}{\mu} \quad (19)$$

$$f_{\sqrt{k}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{Re_{\sqrt{k}}} + \frac{d}{\sqrt{k}} \right) \quad (20)$$

Desse modo, extraindo $Re_{\sqrt{k}}$ do primeiro termo da Equação 17 e substituindo $c = k/d^2$, a seguinte expressão é:

$$i = \frac{1}{Re_{\sqrt{k}} \cdot g \cdot \sqrt{k}} \cdot q^2 + \frac{d}{g \cdot k} \cdot q^2$$

O fator comum $\left(\frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{q^2}{g} \right)$ pode ser isolado, resultando em:

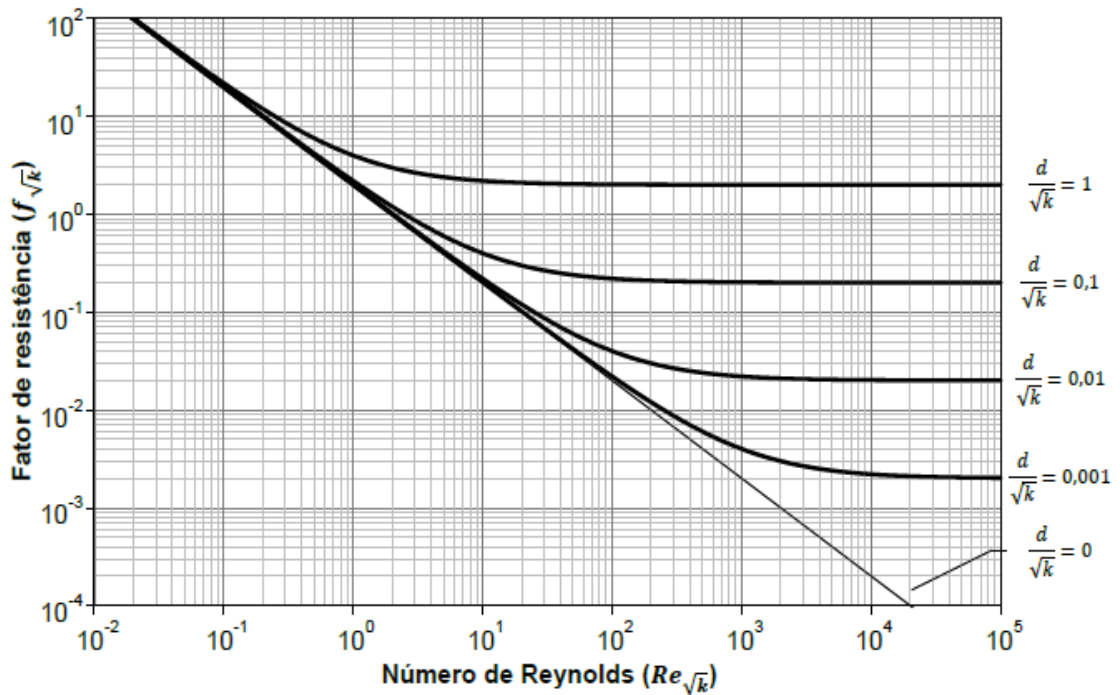
$$i = \left(\frac{1}{Re_{\sqrt{k}}} + \frac{d}{\sqrt{k}} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{q^2}{g}$$

A estrutura algébrica da equação de Darcy-Weisbach, Equação 21, pode ser encontrada na lei de Forchheimer multiplicando ambos os lados da última expressão por 2, o que permite explicar $f_{\sqrt{k}}$ dada pela Equação 20.

$$i = f_{\sqrt{k}} \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{q^2}{2 \cdot g} \quad (21)$$

Destaca-se que de maneira semelhante aos trabalhos de Rouse (1943) e Moody (1944), Lofrano *et al.* (2020) elaboraram um diagrama, relacionando as principais informações do escoamento do fluido no meio poroso, com os valores de $Re_{\sqrt{k}}$, $f_{\sqrt{k}}$ e $\frac{d}{\sqrt{k}}$, a fim de definir seu regime de escoamento, como pode ser observado na Figura 20. Destaca-se que a funcionalidade do diagrama é evidente para escoamentos em meios porosos, diferentemente do Diagrama de Moody, utilizado para projetar condutos forçados.

FIGURA 20 - DIAGRAMA DE FATOR DE RESISTÊNCIA PARA MEIOS POROSOS



FONTE: Lofrano (2018).

Em relação a proposta do diagrama de fator de resistência, Lofrano (2018) destaca pontos relevantes em relação ao regime de escoamento no meio poroso, distinguindo as principais características entre a zona linear e não linear, como descritos, resumidamente, abaixo:

Na Zona Linear, para baixas velocidades (e, portanto, para $Re_{\sqrt{k}}$ menores), todas as curvas convergem para um mesmo trecho linear, independentemente do valor de $\frac{d}{\sqrt{k}}$, logo $f_{\sqrt{k}} = 2 \cdot Re_{\sqrt{k}}$. Nessa zona, trata-se de escoamento em regime laminar, na qual é válida a Lei de Darcy, tendo o mesmo comportamento da curva $f = \frac{64}{Re}$ para tubos, no entanto, a curva $\frac{d}{\sqrt{k}} = 0$ não pode ser tomada como análoga em tubos lisos, onde para números de Reynolds elevados, observa-se desvios com relação a linearidade em razão do surgimento de turbulência. Por outro lado, em meios porosos, a curva $\frac{d}{\sqrt{k}} = 0$ implicaria em um meio sem desvio com relação a zona linear.

Para Zona pós-Linear, há curvas distintas para diferentes $\frac{d}{\sqrt{k}}$, termo que é análogo a rugosidade relativa dos tubos, $\frac{\epsilon}{D}$, e que define o seu escoamento. Onde cada curva, $\frac{d}{\sqrt{k}}$, converge para um ponto assintótico de $f_{\sqrt{k}}$, dado um $Re_{\sqrt{k}}$ elevado suficientemente para não exercer influência, ou seja, $f_{\sqrt{k}} = \theta \cdot \frac{d}{\sqrt{k}}$. No entanto, há uma

região de transição entre o comportamento puramente linear e o assintótico de $f_{\sqrt{k}}$, na qual não podem ser desprezadas características nem do escoamento (relacionados a $Re_{\sqrt{k}}$), tampouco do meio poroso (relacionadas ao $\frac{d}{\sqrt{k}}$), respeitando a relação $f_{\sqrt{k}} = \theta \cdot (Re_{\sqrt{k}} \cdot \frac{d}{\sqrt{k}})$.

A partir do diagrama elaborado, Lofrano (2018) destaca, que:

[...] deve-se tomar cuidado com analogias entre o escoamento em condutos forçados e em meios porosos. Grandes diferenças residem entre os dois, especialmente devido ao reconhecimento de que o princípio do comportamento não linear em meios porosos não está ligado à emergência da turbulência (como ocorre a tubos retilíneos), mas sim a componentes inerciais. Tais componentes devem-se às acelerações e desacelerações induzidas pela conformação espacial dos poros (“tortuosidade”).

Além disso, outros aspectos que estão associados ao diagrama é o Regime de Transição, onde a mudança do caráter linear para o assintótico na relação $f_{\sqrt{k}}$ x $Re_{\sqrt{k}}$, para um dado $\frac{d}{\sqrt{k}}$ em meios porosos, é diferente do regime de transição para condutos forçados, onde se observa um “salto” na relação f x Re_D . Em meios porosos, essa curva apresenta um comportamento contínuo e suave. Conforme as deduções utilizadas para elaboração do diagrama, Lofrano *et al.* (2020) reuniram os efeitos inerciais e de turbulência em um único parâmetro, $\frac{d}{\sqrt{k}}$. Assim, a classificação obtida através da relação $f_{\sqrt{k}}$ x $Re_{\sqrt{k}}$, seria dizer se o regime de escoamento é linear, darciano, ou tornou-se não linear, “não darciano”. Definição e conceito de excelente contribuição para a mecânica dos fluidos nos meios porosos, até então sem bases tão bem fundamentadas.

Destaca-se que a delimitação dos regimes de fluxo em meios porosos não é tão direta quanto no fluxo de condutos forçados. Além de que, a natureza da transição entre os regimes para estes meios é diferente. Não há consenso quanto a delimitação de um regime de escoamento para meios porosos, como pode ser observado nos diferentes intervalos obtidos na literatura (BEAR, 1988; VENKATARAMAN; RAO, 1998; FETTER, 2001; BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2002) como tentativa de definir o escoamento do concreto permeável. Os motivos vão desde inconsistências na determinação do número de Reynolds, até na dificuldade em se realizar uma adequada aplicação da Teoria da Camada Limite (LOFRANO, 2018), sendo a

primeira, principalmente, relacionada ao diâmetro de escoamento do meio poroso. No entanto, Lofrano *et al.* (2020) relata a possibilidade de usar os parâmetros de entropia para caracterizar os regimes de fluxo juntamente com os limiares propostos por Venkataraman e Rao (1998).

As limitações propostas por Venkataraman e Rao (1998) são representadas pelas equações empíricas 22, 23 e 24, para os três regimes de escoamento: Escoamento Darciano, Escoamento de Transição, e Escoamento Turbulento, respectivamente.

$$Re_{\sqrt{k}} \leq \frac{0,17}{\left(\frac{d}{\sqrt{k}}\right)^{1,1}} \quad (22)$$

$$\frac{0,17}{\left(\frac{d}{\sqrt{k}}\right)^{1,1}} < Re_{\sqrt{k}} < \frac{10}{\left(\frac{d}{\sqrt{k}}\right)} \quad (23)$$

$$Re_{\sqrt{k}} \geq \frac{10}{\left(\frac{d}{\sqrt{k}}\right)} \quad (24)$$

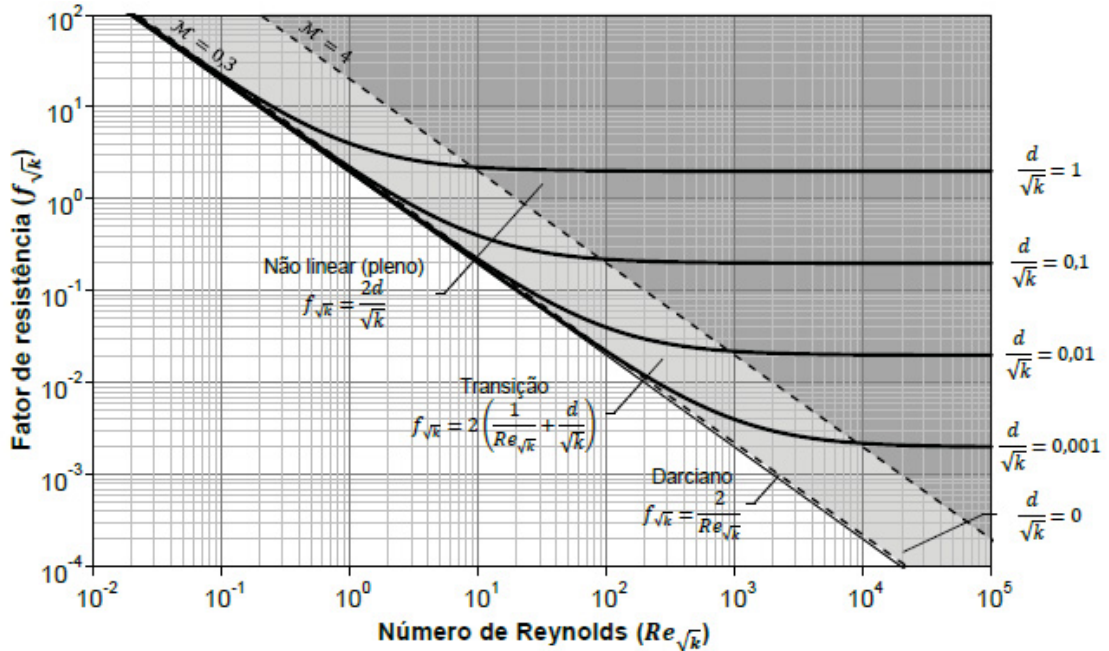
As delimitações de Venkataraman e Rao (1998) são baseadas em dados experimentais, e não em princípios mais sólidos acerca das forças, dos mecanismos de dissipação e das subcamadas atuantes em cada escoamento. A partir dessas considerações, Lofrano *et al.* (2020) definiram em seu estudo os limites para o regime de escoamento Darciano, não Darciano de Transição e de Turbulência, representados pelas Equações 25, 26 e 27, respectivamente. Na Figura 21 é ilustrado o ábaco com as respectivas delimitações apresentadas e aqui denominado de Diagrama de Lofrano *et al.* (2020) para meios porosos.

$$2 \leq Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} \leq 2,4 \quad (25)$$

$$2,4 < Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} < 22 \quad (26)$$

$$Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} \geq 22 \quad (27)$$

FIGURA 21 - DIAGRAMA DE LOFRANO *ET AL.* (2020): DELIMITAÇÕES DOS REGIMES DE ESCOAMENTO EM MEIO POROSOS



FONTE: Lofrano (2018).

Para um d/\sqrt{k} fixo, $f_{\sqrt{k}}$ depende exclusivamente de $Re_{\sqrt{k}}$. Portanto, como mostra a Figura 21, é possível traçar curvas únicas para cada escoamento, d/\sqrt{k} , possibilitando que este parâmetro adimensional seja utilizado para caracterizar um determinado meio poroso de acordo com seu comportamento hidráulico. Deve-se ressaltar que a delimitação dos regimes de escoamento em meios porosos não é tão direta quanto em dutos. Dentre os autores que deram passos consideráveis na tentativa de caracterizar o escoamento, exploraram o assunto de maneira arbitrária no modo de obtenção do número de Reynolds, em específico na maneira de mensurar os parâmetros intrínsecos ao meio poroso. Monter e Haselbach (2006), Kim, Gaddafi e Yoshitake (2016) e Zhang *et al.* (2018) definem esse parâmetro através do diâmetro médio dos poros, como tendência de definição da área permeável em condutos forçados. Nestes estudos, a aplicação deste parâmetro não é a melhor aproximação, e não representa as características do meio poroso permeável.

2.6.2.2 Escoamento não darciano em concreto permeável

Recentemente alguns pesquisadores (DAN *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2018; HATANAKA *et al.*, 2019; DEBNATH; SARKAR, 2019; LEDERLE *et al.*, 2020) verificaram que o escoamento no concreto permeável, ou em meios porosos similares, não segue um comportamento linear como previsto pelo regime darciano, basta variar a carga hidráulica para verificar que a relação entre gradiente hidráulico, i , e velocidade, q , passam a pertencer as funções não lineares. É inegável as contribuições de diversos pesquisadores, no entanto ainda continuam utilizando equações darcianas ($i = k \cdot q$) para obtenção do coeficiente de permeabilidade (KEVERN *et al.*, 2008; NEITHALATH *et al.*, 2010; LUND *et al.*, 2014; GAEDICKE *et al.*, 2014; IBRAHIM *et al.*, 2014; QIN *et al.*, 2015; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; KHANKHAJE *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2016; AKAND; YANG; GAO, 2016; SONEBI *et al.*, 2016; PIERALISI, 2016; NGUYEN *et al.*, 2017; CUI *et al.*, 2017; YU *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2018; VALÉRIO *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019; GARCIA *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2019; SANDOVAL *et al.*, 2017; SHANG; SUN, 2019; SANDOVAL *et al.*, 2020).

Com base no atual levantamento bibliográfico, destaca-se a falta de uma estrutura de caracterização do escoamento no concreto permeável. Na literatura não são apresentados critérios bem definidos que delimitem o regime de escoamento e que direcione uma metodologia apropriada para obter as propriedades hidráulicas deste meio poroso. Não há abordagens claras e concisas sobre a influência da conformação do espaço poroso, da conectividade dos poros, ou de qualquer outro fator que interfira na dissipação de energia quando o escoamento deixa de ser darciano.

Percebe-se que a persistência pelo uso da equação de Darcy está no simples fato da consideração inicial do regime como linear. No entanto, a aplicação de diferentes gradientes hidráulicos já seria suficiente para obter diferentes comportamentos e, assim, modificar o direcionamento dos estudos, como vem ocorrendo.

Na sequência, são discutidas as principais, e mais recentes, abordagens que começaram a verificar o escoamento no concreto permeável a partir da não linearidade imposta pela Lei de Darcy. É notável que passos significativos estão

ocorrendo para o desenvolvimento da tecnologia do concreto permeável, e da dinâmica do fluido no meio poroso, no entanto, ainda com incertezas.

Chandrappa e Biligiri (2016) iniciaram a discussão sobre o efeito do gradiente hidráulico no coeficiente de permeabilidade, K , obtido por Darcy em permeâmetro de carga variável. Descreveram sua não linearidade, no entanto utilizaram a equação empírica de Izbash, Equação 28, para ajustar os dados. Onde a e b são os coeficientes de ajuste.

$$i = a \cdot K^b \quad (28)$$

Posteriormente, a equação de Kozeny-Carman foi utilizada para ajustar as relações entre coeficiente de permeabilidade e a porosidade, P , obtendo seu respectivo coeficiente A , representando a tortuosidade e superfície específica do meio poroso, descrita na Equação 29.

$$K = \frac{P^3}{(1 - P)^2} \cdot A \quad (29)$$

Diferente dos demais autores, o estudo de Zhang *et al.* (2018) buscaram definir o regime de escoamento através de uma análise gráfica a partir dos dados de velocidade/gradiente hidráulico, obtidos por simulação computacional, utilizando-se de um modelo geométrico, 40 x 40 mm, reduzido em relação ao elemento prismático produzido em laboratório, e representado através de tomografia computadorizada de raio-x. A partir desses dados hidráulicos, estabeleceram-se limites entre o regime linear (reta) e não linear (exponencial). A diferença de regime de escoamento foi expressiva quando a carga hidráulica foi maior que 900 Pa/m, onde a equação de Forchheimer é comparativamente mais apropriada. Determinaram, assim, a partir de definições fundamentadas por Bear (1972), que o número de Reynolds inferior ao intervalo 6,4 - 9,5 seria correspondente ao escoamento linear, entre 6,4 – 9,5 até 100, seria escoamento não linear de transição, e acima de 100 escoamento turbulento.

Apesar de interessante, a metodologia utilizada pelos autores na definição do regime de escoamento torna-se um método inviável, pois necessitaria realizar para cada amostra permeável, e ainda, que cada amostra tivesse escoamento linear e não linear, o que pode não ocorrer em função das diferentes vazões/gradientes ensaiadas,

e até em função da heterogeneidade do meio poroso. Além disso, para validar o regime de fluxo, os autores fazem considerações não apropriadas no cálculo do número de Reynolds, que utilizam o diâmetro médio dos poros do CP para caracterizar o meio físico, complexo e heterogêneo, do concreto permeável.

Debnath e Sarkar (2019) estudaram concreto permeável com adições de agregados de tijolos, no entanto com o foco de traçar uma relação entre o coeficiente de permeabilidade e a porosidade. A abordagem que realizaram foi semelhante a de Chandrappa e Biligiri (2016a), retratando a não linearidade do coeficiente de permeabilidade, ainda obtido por Darcy, e buscando um melhor ajuste pela equação de Kozney-Carman modificado, com definições de tortuosidade em função das características físicas do agregado.

Hatanaka *et al.* (2019) retrataram o comportamento não linear do escoamento no concreto permeável, estabelecendo que a velocidade média do fluxo e o gradiente hidráulico estão relacionados à função exponencial, e que a linearidade de Darcy não é mais aplicável, sem demais detalhes ou abordagens sobre o regime do escoamento e a conectividade do meio poroso.

Por outro lado, Lederle *et al.* (2020) contribuem de modo mais significativo para o estudo. Estes autores verificaram a relação não linear entre a velocidade e o gradiente hidráulico, obtido em permeâmetro de carga constante e começam a investigar o regime do escoamento no meio poroso. Para determinar o número de Reynolds, os autores utilizaram a imagem da seção transversal do CP para mensurar o diâmetro médio dos poros, o que é totalmente inviável numa aplicação prática, uma vez que o corte da seção transversal pode danificar a estrutura porosa, e não é garantia que este valor represente as características físicas do meio poroso. O número de Reynolds obtido foi de 4,7 a 87 em função da velocidade do escoamento, que variou entre 0,0016 m/s e 0,018 m/s, respectivamente. Destaca-se que o intervalo utilizado para definir o regime de escoamento está oculto em seu trabalho, no entanto concluem que o número de Reynolds é fundamentalmente maior para o fluido ser classificado como um escoamento linear, e que a Lei de Darcy não deve ser mais aplicada.

Lofrano (2018) destaca pesquisadores (SCHNEEBELI, 1955; HUBBERT, 1956; WRIGHT, 1968) que estudaram escoamento em diferentes meios porosos, e que relataram diferentes valores para o número de Reynolds para o início do escoamento turbulento, não tendo consenso. Este fato não é surpreendente, pois

diferentemente do comportamento obtido em condutos forçados, o desencadeamento da não linearidade, ou “turbulência”, em meios porosos está atrelado as características de cada meio.

Além disso, destaca-se que as recomendações técnicas da ACI 522R-10 (2010), sobre o escoamento no concreto permeável, possuem uma abordagem geral, com definições e correlações entre as principais propriedades permitindo, apenas, um pequeno direcionamento, sem aspectos aprofundados e que fundamentem este estudo. Sem nenhuma relação sobre a conformação do espaço poroso, e de sua conectividade, sem menções sobre a linearidade, ou não linearidade, do escoamento nos meios porosos. A partir do ano de sua publicação, em 2010, não houve revisões e novas diretrizes direcionadas na caracterização do escoamento em concreto permeável, por outro lado, são os periódicos que vêm contribuindo com o estado de conhecimento e servindo de bases para o desenvolvimento tecnológico do material.

2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES

2.7.1 Agregados

As características físicas dos agregados, assim como sua granulometria, influenciam nas propriedades do concreto permeável (PARK; TIA, 2004; TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004; SCHAEFER *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2006; KEVERN *et al.*, 2008; KIM; LEE, 2010; LIAN; ZHUGE, 2010; KEVERN *et al.*, 2010; HENDERSON; TIGHE, 2012; SRIRAVINDRARAJAH; WANG; ERVIN, 2012; SINDHU; RAJAGOPAL, 2015; TIJANI *et al.*, 2019; DEBNATH; SARKAR, 2019). Os agregados devem ser rígidos, limpos e isentos de revestimentos, tais como poeira ou argila, ou outros produtos químicos adsorvidos que possam prejudicar a ligação pasta/agregado ou a hidratação do cimento (ACI 522R-10, 2010)

A qualidade do agregado é tão importante no concreto permeável quanto no concreto convencional, no entanto cada um com sua particularidade. Evitar partículas alongadas pode melhorar o desempenho mecânico, pois não transmite a força aplicada de forma idêntica nas três dimensões, como nos agregados mais esféricos, que produzem menor conteúdo de vazios. Por outro lado, deve-se avaliar o seu efeito na distribuição da pasta de cimento influenciado pelo processo de compactação

(TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004; KEVERN *et al.*, 2008; ACI 552R-10, 2010; LIAN; ZHUGE, 2010).

Segundo os resultados obtidos por SCHAEFER *et al.* (2006), para traços com mesmo volume de pastas, agregados de mesma origem mineralógica e uniforme, quanto maior o diâmetro médio dos agregados grãos maiores serão os poros, e consequentemente, também o coeficiente de permeabilidade. Estas conclusões também são confirmadas por Yu *et al.* (2019), que verificaram diferentes coeficientes de permeabilidade de amostras de concreto permeável com porosidades próximas, com um aumento significativo nos agregados de maiores dimensões. Além disso, notaram que poros do concreto permeável geralmente são cercados de três a sete agregados, independentemente de sua dimensão, o que pode influenciar na conectividade do material.

Jing e Guoliang (2003), Park e Tia (2004), Sriravindrarajah, Wang e Ervin (2012) e Zhong e Wille (2016) conduziram campanhas experimentais para determinar o desempenho do concreto permeável com agregados grãos de diferentes dimensões, e verificaram que a resistência à compressão é mais elevada quando a dimensão do agregado é menor, isto é atribuído ao aumento do número de ligações entre os agregados vizinhos. O agregado miúdo é geralmente excluído do concreto permeável, mas a adição de uma pequena fração, de até 7% em massa de agregado grão, pode contribuir para seu desempenho mecânico, não prejudicando a permeabilidade (KEVERN *et al.*, 2008). A presença de agregado miúdo na mistura porosa ajuda no preenchimento vazios/poros disponíveis na mistura e tende a reduzir a porosidade e, consequentemente, seu coeficiente de permeabilidade (DEBNATH; SARKAR, 2019).

Kim e Lee (2010) compararam a diferença entre os concretos permeáveis usando diferentes agregados e observaram que as misturas com argila expandida, com densidades próximas a 1000 kg/m^3 , apresentaram menor resistência à compressão do que utilizando cascalho (densidades próximas a 1600 kg/m^3), como esperado. Chen *et al.* (2019) retrataram que as misturas de concreto permeável com escória e cinza volante apresentaram a mesma resistência ao ciclo gelo-degelo, mas resultaram em menor resistência mecânica em relação ao traço sem adições, no entanto abre a possibilidade de notáveis vantagens no custo, economia de energia e redução de gases do efeito estufa.

Sriravindraraja, Wang e Ervin (2012), Bhutta *et al.* (2013) e Liu *et al.* (2019) retrataram que o concreto permeável feito com agregados reciclados apresentou menor resistência à compressão quando comparado com concreto permeável feito com agregados naturais. Sriravindraraja, Wang e Ervin (2012) obtiveram uma redução na resistência à compressão de 18,8 MPa para 7,9 MPa com a substituição total de agregados naturais por agregados reciclados, em um corpo de prova com 20% de porosidade. Bhutta *et al.* (2013) obtiveram uma redução de aproximadamente 20% na resistência, em relação a mesma porosidade, com a mudança de agregado. Liu *et al.* (2019) destacam que as aplicações de concreto permeável com agregado reciclado normalmente são dificultadas por sua significativa redução na resistência à compressão, no entanto, com adição de emulsão de polímero de silano, houve melhoras significativas na resistência do concreto permeável, mantendo as respectivas porosidades.

Destaca-se que a redução da resistência à compressão pela utilização de RCC está relacionada, principalmente, a capacidade resistente do material reciclado, atribuída a sua característica mineralógica, que na maioria dos casos, são agregados provenientes da britagem de materiais cerâmicos e, além disso, possuem maior área específica, absorvendo maior volume de água de amassamento, o que promove misturas com menor capacidade de adensamento quando comparados a agregados naturais, resultando em um concreto mais poroso e com menor resistência à compressão.

2.7.2 Relação água/cimento (a/c)

A relação a/c utilizada no processo de confecção do concreto permeável influencia diretamente em suas propriedades. A partir da revisão da literatura (*vide Tabela 1*), nota-se uma amplitude considerável na relação a/c, variando de 0,2 a 0,5, assim como verificou a NRMC (2004) e Kia, Wong e Cheeseman (2017). No entanto, percebe-se a utilização predominante da relação a/c em 0,30. Além disso, a inclusão de aditivos químicos plastificantes altera sua relação e pode contribuir para o desempenho da mistura (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004; LIAN; ZHUGE, 2010).

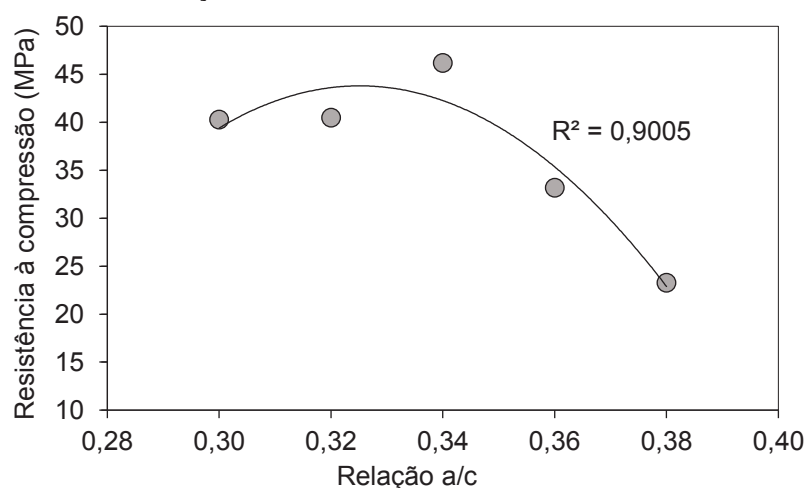
No processo de dosagem do concreto permeável, as relações a/c normalmente possuem pequenas variações, uma vez que qualquer alteração mais expressiva pode tornar a pasta seca demais ou muito fluida, inviabilizando sua

aplicação. As baixas relações a/c deixam o concreto permeável mais seco durante a mistura e com maior aderência entre os agregados. Por outro lado, as altas relações a/c produzem uma pasta que pode segregar durante seu lançamento, fechando os poros inferiores e diminuindo a permeabilidade, apesar de manter a porosidade. Além disso, a consistência do concreto permeável deve ser compatível com o tipo de compactação submetido, garantindo um melhor acabamento (MEININGER, 1988; KEVERN *et al.*, 2008; ACI 522R-10, 2010; DEBNATH; SAKAR, 2019).

Segundo as normativas da PCP (TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004) a adequada relação a/c para o concreto permeável é quando as partículas estiverem inteiramente cobertas com pasta, de modo que ao apertar com a mão o concreto forme um conjunto maciço que não se desintegrará ou perderá sua estrutura vazia à medida que a pasta flua entre os agregados.

Lian e Zhuge (2010) observaram diferentes comportamentos ao variar a relação a/c de 0,3 até 0,38. Na Figura 22 pode ser observado os resultados médios, retratando que para um aumento da relação a/c entre 0,3 a 0,34 houve um aumento na resistência à compressão. Já a variação da relação a/c de 0,34 para 0,38 houve uma redução da resistência, sendo a relação 0,34 definida como o ponto ótimo.

FIGURA 22 – RELAÇÃO ENTRE A/C E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO



FONTE: Adaptado Lian e Zhuge (2010).

Para Chandrappa e Biligiri (2016a), à medida que a relação a/c aumentou, de 0,25 para 0,35, a consistência da pasta na mistura de concreto permeável também aumentou, o que auxiliou no melhor adensamento da mistura, resultando em menor porosidade e menor coeficiente de permeabilidade. Debnath e Sakar (2019)

verificaram que a faixa ótima para a relação a/c é selecionada entre 0,30 e 0,32, dentre as relações estudadas de 0,28, 0,30, 0,32 e 0,35.

A partir disso, nota-se diferentes comportamentos na literatura, não há consenso, nem delimitações claras sobre qual a relação a/c ideal, sendo específica para cada traço, reafirmando a sensibilidade do concreto permeável em função de sua consistência. Desse modo, são necessárias maiores investigações sobre a consistência do concreto permeável e no desenvolvimento de metodologias que permitam definir intervalos confiáveis da relação a/c a partir dos materiais constituintes.

Após a metodologia descrita por Tennis, Lemin e Akers (2004), pioneiros na tentativa de estabelecer critérios para consistência ideal do concreto permeável, Nguyen *et al.* (2014) propuseram uma metodologia mais robusta, a fim de definir a relação a/c ideal, sendo obtida através de um teste de drenagem da pasta de cimento. O ensaio é realizado em um peneirador mecânico que vibra o concreto no estado fresco, por 15 s, sobre uma peneira de diâmetro inferior ao do agregado, e a consistência ideal é atingida quando não há excesso de pasta. Assim, estes autores produziram concretos permeáveis com relações a/c variando de 0,28 a 0,40, em intervalos de 0,02. Em função dos materiais constituintes, a aplicação do método resultou em uma consistência considerada “ideal” com a relação a/c de 0,36. Para relações superiores houve segregação da pasta, e para relações inferiores notou-se uma consistência mais seca, o que inviabilizaria a aplicação.

2.7.3 Volume de pasta

Segundo a ACI 522R-10 (2010), o volume de pasta deve ser apenas o suficiente para envolver e unir os agregados, criando um sistema com vazios interligados e servindo como região de transmissão de esforços entre as partículas, garantindo o desempenho mecânico.

O aumento do volume de pasta resulta em aumentos consideráveis na resistência à compressão do concreto permeável, independentemente do tamanho do agregado, porém diminui a porosidade e o coeficiente de permeabilidade (KEVERN, *et al.*, 2008; NEITHALATH; DEO, 2011; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2011; YAHIA; KABAGIRE, 2014; TORRES; HU; RAMOS, 2015). Além disso, nota-se que o excesso de pasta pode levar a segregação e fechamento dos poros inferiores do

concreto, resultando em uma camada inferior impermeável (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

Segundo Yang e Jiang (2003), o volume de pasta tem influência significativa na resistência à compressão do concreto permeável, uma vez que a ruptura ocorre em decorrência da falha na camada de pasta na interface dos agregados. Já para os pesquisadores Yahia e Kabagire (2014), a característica da ruptura do concreto permeável depende do volume de pasta em relação ao volume de vazios, notando que os CPs confeccionados com uma relação do volume de pasta de cimento/volume de vazios inferiores a 40%, a falha sempre ocorre na interface entre o agregado e a camada de pasta. Por outro lado, quando o concreto é confeccionado com um maior volume de pasta, a falha sempre ocorre no agregado, o que significa que a pasta de cimento passa a ser mais resistente.

A partir da revisão da literatura, nota-se a tendência em atribuir significados físicos para a consistência do concreto permeável apenas em função da relação a/c. Desse modo, ressalta-se que o volume de pasta ($V_p = V_{\text{água}} + V_{\text{cimento}}$) é uma variável independente e qualquer modificação em seu teor, ainda que mantida a mesma relação a/c, pode influenciar na consistência do concreto permeável. Assim, o estudo da consistência do concreto permeável deve considerar as duas situações independentes, que no final se complementam.

A partir dessas considerações, campanhas experimentais avaliativas da consistência do concreto permeável foram propostas nesta tese, até então pouco exploradas na literatura.

2.7.4 Métodos de compactação

As diferentes energias de compactação podem influenciar nas propriedades do concreto permeável e devem fazer parte do seu processo de dosagem (GHAFOORI; DUTTA 1995a; SULEIMAN *et al.*, 2006; KEVERN *et al.*, 2008; LIAN; ZHUGE, 2010; NEITHALATH; DEO, 2011; NGUYEN *et al.*, 2014; BONICELLI *et al.*, 2015; PIERALISI; CAVALARO; AGUADO, 2017; COSTA *et al.*, 2018; CAVALARO; BLANCO; PIERALISI, 2018).

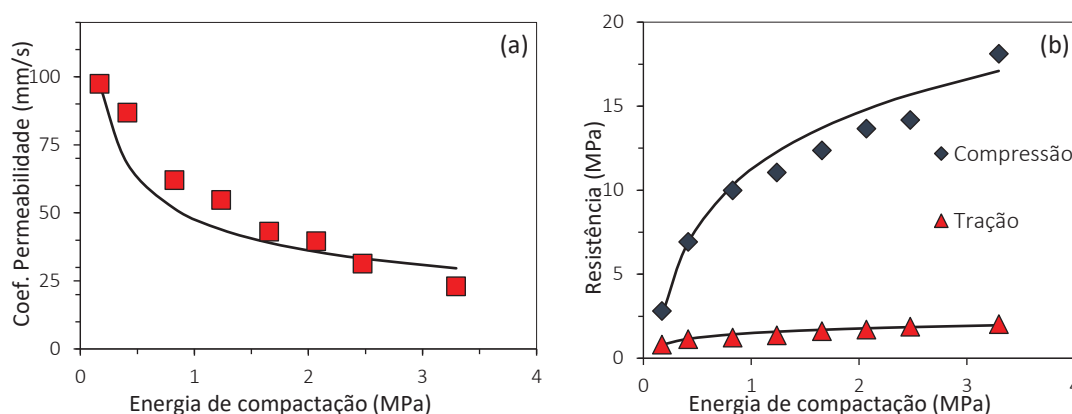
Pioneiro no estudo do concreto permeável, Meininger (1988) verificou diferentes níveis e tipos de compactação, utilizando Martelo de Proctor; Compactação com haste metálica; Compactação com o lançamento no estado solto, e, para todos,

concluíram que a maior energia de compactação refletiu na maior resistência à compressão, devido à redução no conteúdo de vazios. Suleiman *et al.* (2006) compactaram concreto permeável com haste, em três camadas com 25 golpes cada, e após a compactação, o molde foi adensado em mesa vibratória por cinco segundos com duas amplitudes de vibração diferentes, 0,127 mm e 0,086 mm, e obtiveram uma redução de 11% na resistência à compressão para a de menor intensidade.

Bonicelli *et al.* (2015) estudaram a compactação do concreto permeável com quatro níveis de intensidade fornecidos pelo Martelo de Proctor: 5, 10, 15 e 20 golpes, com o respectivo aumento da densidade, e menores valores do coeficiente de permeabilidade e da porosidade.

Ghafoori e Dutta (1995a) analisaram as propriedades físicas de quatro composições submetidas a diferentes níveis de energia de compactação. A compactação foi realizada com lançamento de um peso de 2,27 kg a partir de oito diferentes alturas, e observaram alta redução no coeficiente de permeabilidade em todas as composições entre o nível mínimo e máximo de energia aplicada e, conseqüentemente, um aumento da resistência à compressão e à tração, como pode ser observado nas FIGURA 23a e 23b, respectivamente.

FIGURA 23 – RELAÇÃO ENTRE ENERGIA DE COMPACTAÇÃO E (A) COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E (B) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO



FONTE: Adaptado Ghafoori e Dutta (1995a)

Destaca-se que o tipo e nível de compactação são variáveis distintas. O primeiro está relacionado ao mecanismo utilizado para transmitir a carga, se axial, haste, ou tridimensional, vibração, por exemplo. O segundo está relacionado a intensidade de carga aplicada. Desse modo, os estudos devem considerar a interação

entre ambos, a fim de padronização metodológica (PIERALISI; CAVALARO; AGUADO, 2016).

Costa *et al.* (2018) compararam testemunhos extraídos de uma laje (650 mm de comprimento x 450 mm de largura x 200 mm de altura) compactada com rolo de 48,8 kg/m, com CPs cilíndricos (200 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro) compactados com 20 golpes em cada uma das duas camadas utilizando Martelo de Proctor, e constataram uma maior variabilidade da permeabilidade nos resultados obtidos para os testemunhos do que em relação aos CPs moldados *in loco*. Essa variabilidade pode ser atribuída as diferenças de pressão pela passagem do rolo na laje. Destaca-se que a utilização do rolo possui instrução metodológica na ACI 522R-10 (2010) para pavimentos de tráfego. Os testemunhos obtidos tiveram um resultado interessante, com maior porosidade que os CPs moldados, no entanto isso não foi condição para uma maior permeabilidade, pois a passagem do rolo conduziu a um maior fechamento dos poros superiores da laje, reduzindo o coeficiente de permeabilidade.

Deste modo, nota-se claramente, e com consenso entre os pesquisadores, quais os reflexos da compactação nas propriedades do concreto permeável. A determinação da compactação também está relacionada com os objetivos da moldagem, que pode ser um simples corpo de prova, ou um elemento pré-moldado de grandes dimensões. Dentre os tipos mais comuns, destacam-se, então, a haste, por vibração, Martelo de Proctor e rolo compactador. As escolhas dos tipos de equipamento e da intensidade de aplicação são definições que devem estar atreladas as características dos materiais constituintes, apresentados nos itens acima, com influência direta do volume de pasta, relação a/c e características físicas dos agregados. Análises que serão propostas nas campanhas experimentais.

2.8 DISCUSSÃO

O presente capítulo elucida o estado da arte e as principais lacunas de conhecimento na área do concreto permeável. Desse modo, resumidamente, as principais considerações relacionadas a revisão supracitada, a seguir, sumarizadas:

- As propriedades do concreto permeável são suscetíveis a mudanças bruscas de comportamento para alterações sensíveis nos seus materiais constituintes. Assim, para o melhor entendimento da tecnologia do concreto

permeável, necessita-se de campanhas experimentais robustas, que verifiquem as influências da relação a/c, volume de pasta, métodos de compactação e delimitações das faixas granulométricas.

- Recentemente as buscas por caracterizações do concreto permeável através de métodos não destrutivos (ultrassom) tornam-se evidente, notando-se uma área em potencial, no entanto sua aplicabilidade está limitada, principalmente, a macroporosidade do concreto permeável, que provoca atenuação na propagação da onda ultrassônica. Além disso, há uma notável influência dos materiais constituintes, necessitando de maior investigação.

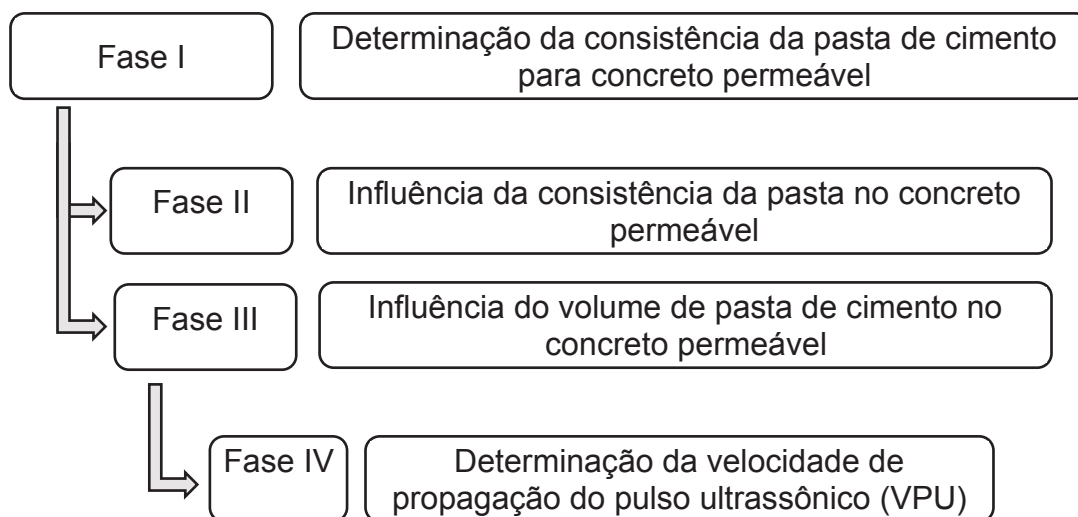
- As lacunas de conhecimento se tornam mais evidentes quando a abordagem é sobre o comportamento hidráulico do concreto permeável, principalmente devido à falta de padronização metodológica e dos equipamentos para ensaios. Não há instrução normativa para caracterização do escoamento em laboratório, normalmente são utilizados permeâmetros de carga constante ou variável, sem especificações metodológicas.

- No atual estado do conhecimento não há uma metodologia bem estruturada que delimite o regime de escoamento do concreto permeável, sendo predominantemente considerado como regime linear. A busca por definições da heterogeneidade do meio poroso se torna evidente, ainda mais em mensurar sua influência do escoamento. Para isso, o estudo deve considerar, a partir de critérios bem fundamentadas na mecânica dos fluidos, o fator de atrito e número de Reynolds para cada vazão/gradiente hidráulico, o que ajudará em sua caracterização e a evitar a subestimação e/ou superestimação do escoamento. Em se tratando de ferramentas de simulação computacional, ainda que poucos estudos nesta linha, o entendimento do escoamento no concreto permeável pode ser explorado numa escala além do realizado experimental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para uma melhor compreensão do programa experimental realizado, este capítulo foi dividido em três seções. A primeira seção trata das características físicas dos materiais utilizados na produção do concreto permeável. Na segunda seção, foi descrita a metodologia adotada para o cumprimento dos objetivos propostos nesta tese doutoral, compondo-se de quatro fases sequenciais, como podem ser observadas na Figura 24. A Fase I é a precursora do estudo, a fim de determinar parâmetros de dosagem para produção do concreto permeável, em específico na definição da consistência limite. Derivativas desta, estão as Fase II e III, com a caracterização das propriedades do concreto permeável para diferentes relações a/c e diferentes relações P/Ag , respectivamente. Por fim, destaca-se a Fase IV com a investigação dos CPs de concreto permeável, obtidos na fase anterior, através da velocidade do pulso ultrassônico.

FIGURA 24 - ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL



A última seção deste capítulo aborda a descrição dos ensaios de caracterização do concreto permeável utilizados no programa experimental, sendo dividido em cinco etapas, como pode ser observado na Figura 25.

FIGURA 25 - ETAPAS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Etapa I	Determinação da densidade e porosidade no estado fresco
Etapa II	Determinação da densidade e porosidade no estado endurecido
Etapa III	Determinação da porosidade efetiva
Etapa IV	Determinação das propriedades hidráulicas
Etapa V	Determinação da resistência à compressão

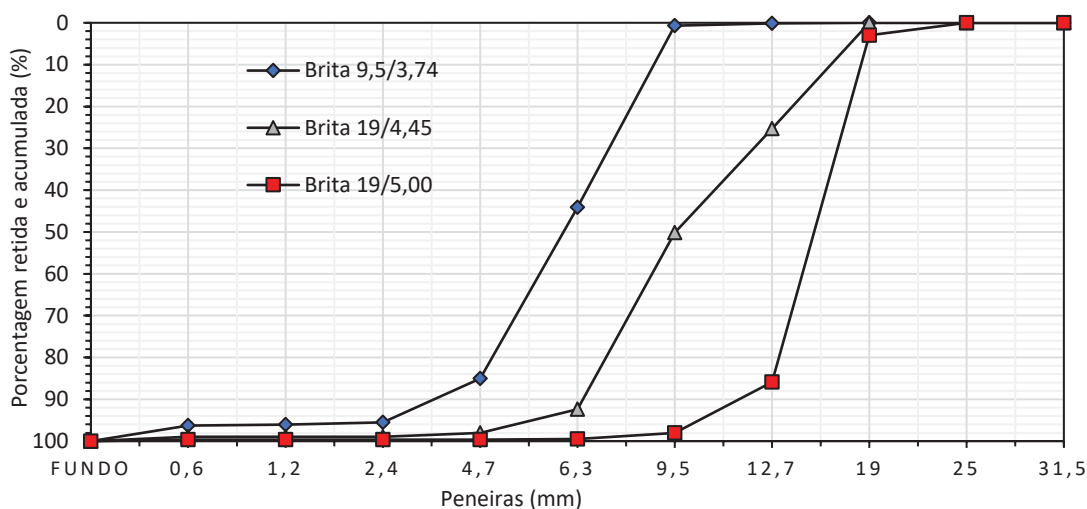
Além dos ensaios elencados neste capítulo, destaca-se que outros procedimentos experimentais foram realizados e apresentados no Apêndice 4. Todos os ensaios descritos neste capítulo foram realizados no Laboratório de Materiais e Práticas Construtivas nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Agregados graúdos

Os agregados graúdos foram obtidos por um processo de peneiramento a partir de três conjuntos granulares de origem basáltica adquiridos em uma pedreira localizada na região centro-norte do Paraná. A nomenclatura de cada conjunto granular segue o padrão de “Brita DMC/MF”, relacionado com diâmetro máximo característico (DMC) e módulo de finura (MF). Na Figura 26 podem ser observadas a distribuição granulométrica dos três conjuntos granulares adquiridos para o estudo.

FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS CONJUNTOS GRANULARES



Na Tabela 4 podem ser observados o diâmetro máximo característico, módulo de finura, massa unitária e massa específica que foram obtidos seguindo instruções da ABNT NBR NM 248 (2003), ABNT NBR NM 45 (2006) e ABNT NBR NM 53 (2009), respectivamente.

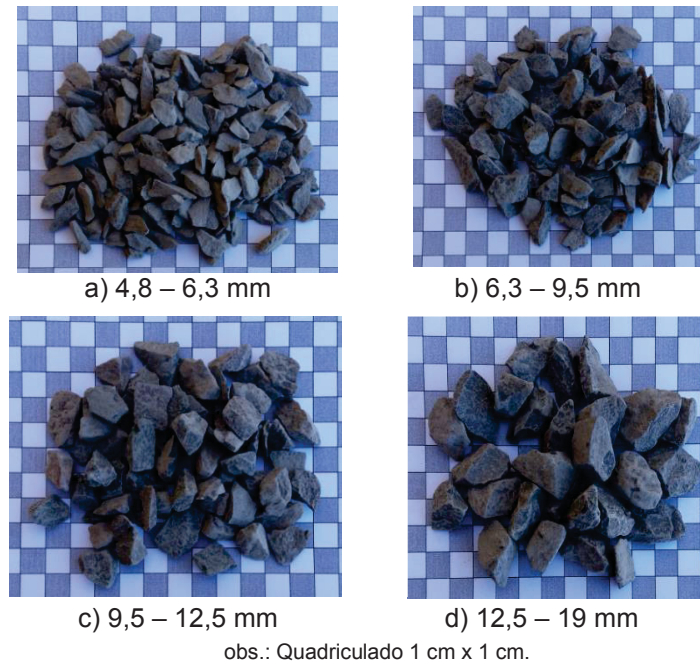
TABELA 4 – CLASSIFICAÇÃO DO AGREGADO DOS CONJUNTOS GRANULARES

Conjunto granular	DMC (mm)	MF	Massa unitária compactada (kg/m³)	Massa específica (kg/m³)
Brita 9,5/3,74	9,5	3,74	1.531,94	3.014,04
Brita 19/4,45	19	4,45	1.591,56	
Brita 19/5,0	19	5,0	1.598,92	

Devido as distribuições granulométricas dos conjuntos granulares fornecidos não pertencerem ao intervalo das zonas granulométricas indicadas pela ABNT NBR 7211 (2009) – Agregados para concreto; estes foram separados em quatro frações granulométricas uniformes por meio de peneiramento manual. O processo de peneiramento seguiu as recomendações da ABNT NBR NM 248 (2003), sendo a peneira agitada por tempo não inferior a 2 min e verificado, se após um minuto de agitação, a massa do material passante foi inferior a 1% da massa do material retido. Após o término do processo de peneiramento, foram obtidas quatro frações granulométricas: 4,8 - 6,3 mm,

6,3 - 9,5 mm; 9,5 - 12,5 mm; e 12,5 - 19 mm. Na Figura 27 podem ser observados os aspectos superficiais dos agregados separados em suas quatro frações granulométricas.

FIGURA 27 – ASPECTO SUPERFICIAL DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS



A fim de obter uma caracterização completa, de modo a verificar possíveis fatores granulométricos que influenciam nas propriedades do concreto permeável, as frações granulométricas também foram caracterizadas pelos seguintes ensaios:

- Índice de forma (IF): ABNT NBR 7809 (2006);
- Índice de esfericidade (Ψ_k): Método proposto por Krubein (1941);
- Método de Zinng (1935).

Com o auxílio de um paquímetro foram realizadas as medições de três dimensões (comprimento, largura e espessura) de 200 agregados de cada fração granulométrica. A partir desses dados, pode-se calcular o índice de forma, de acordo com a Equação 30, e o índice de esfericidade, de acordo com a Equação 31, elencados na Tabela 5.

$$IF = \frac{c}{e} \quad (30)$$

$$\psi_k = \sqrt[3]{\frac{c \cdot l \cdot e}{c^3}} \quad (31)$$

TABELA 5 – DIMENSÕES, ÍNDICE DE FORMA E ESFERICIDADE DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS

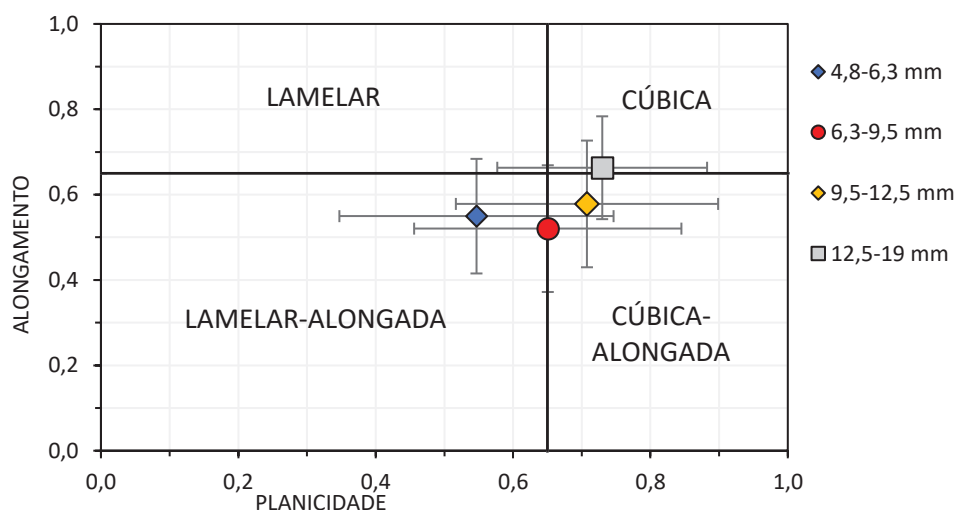
Frações Granulométricas	Comprimento (c)	Largura (l)	Espessura (e)	Índice de forma (Desvio Padrão)	Esfericidade (Desvio Padrão)
	Média (mm) (Desvio Padrão)				
4,8 - 6,3	13,48 (2,61)	7,08 (1,10)	3,76 (0,91)	3,89 (1,33)	0,53 (0,08)
6,3 - 9,5	15,96 (2,92)	10,08 (1,58)	5,09 (1,64)	3,29 (1,03)	0,59 (0,09)
9,5 - 12,5	18,79 (3,14)	12,97 (1,76)	7,34 (2,14)	2,78 (1,02)	0,65 (0,09)
12,5 - 19	24,43 (3,49)	17,55 (2,22)	11,47 (2,35)	2,24 (0,64)	0,70 (0,08)

Nota-se que os índices de forma de todas as frações granulométricas foram maiores que 1,0, valor recomendado pela ABNT NBR 7211 (2009) para concreto convencional. E a esfericidade foi maior à medida que o $D_{médio}$ dos agregados aumentou. Destaca-se que essas recomendações, das características físicas dos agregados, não se aplicam, em regra, para o concreto permeável, que podem ter diferentes comportamentos em relação ao concreto convencional.

A classificação do agregado é de fundamental importância para atribuir sentido físico as propriedades do concreto permeável, o qual suas características influenciam no processo de compactação, afetando adversamente a área de contato entre os agregados e levando, assim, a diferentes densidades e resistências à compressão e à tração (SCHAEFER *et al.*, 2006; ACI 522, R-10, 2010; LIAN; ZHUGE, 2010). Desse modo, nota-se a necessidade de maior investigação em relação a influência do formato e da granulometria dos agregados nas propriedades do concreto permeável.

Na Figura 28 podem ser observados os valores de alongamento (relação entre espessura e largura – e/l) e planicidade (relação entre largura e comprimento l/c) das frações granulométricas pela classificação de Zinng (1935).

FIGURA 28 – CLASSIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS SEGUNDO O DIAGRAMA DE ZINGG (1935)



Segundo a classificação proposta por Zingg (1953), as frações granulométricas possuem predominantemente aspectos alongados, com ressalva para classe 12,5-19 mm, que está no limiar entre duas classificações, o que dificulta a interpretação, mas com tendência ao aspecto cúbico. Além disso, nota-se que à medida que o $D_{\text{médio}}$ diminui, o agregado tende a deixar seu formato cúbico, em direção a uma característica mais lamelar, situação que pode estar diretamente relacionada ao processo de britagem do basalto e da sua característica mineralógica. De modo geral, nota-se que o índice de forma médio aumentou para agregados de menores diâmetros e para os mais lamelares, consequentemente com uma menor esfericidade. Os índices de forma obtidos são estatisticamente diferentes entre todas as frações granulométricas, segundo ANOVA e Teste Tukey, com $p\text{-valor} \leq 1,37 \times 10^{-5}$.

Na Tabela 6 podem ser observadas as características físicas das frações granulométricas em estudo, com a determinação da massa unitária no estado solto, realizada segundo a ABNT NBR 45 (2006), com dados do índice de vazios e do índice de empacotamento.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS: ESTADO SOLTO

Propriedades	Frações granulométricas (mm)			
	4,8-6,3	6,3-9,5	9,5-12,5	12,5-19
Diâmetro médio (mm)	5,55	7,90	11,00	15,75
Massa unitária (kg/m ³) (Desvio padrão)	1.333,54 (1,45)	1.374,01 (2,35)	1.439,13 (2,68)	1.451,82 (1,66)
Índice de vazios	0,558	0,544	0,523	0,518
Índice de empacotamento	0,452	0,456	0,477	0,482

Nota-se que as massas unitárias, assim como os índices de empacotamento, de todas as frações granulométricas, são maiores para os agregados com maior esfericidade, ou mais próximas de uma fração granulométrica com característica cúbica, reforçando as definições usuais da literatura, como a de Oliveira *et al.* (2000), que relatam que agregados esféricos promovem maiores densidades de empacotamento do conjunto granular.

3.1.2 Cimento Portland

O concreto permeável é muito utilizado como peças pré-moldadas em função de sua aplicação em pavimentos. A rápida desforma é um requisito fundamental para estes tipos de peças, sendo recomendado, normalmente, o uso do cimento Portland CP V-ARI, com alta resistência inicial⁴. No entanto, optou-se pelo uso do Cimento Portland CP II-Z.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Fase I: Determinação da consistência da pasta de cimento

Esta fase do programa experimental objetivou determinar parâmetros de dosagem do concreto permeável com foco na consistência da pasta (relação a/c em função da relação P/Ag). Para isso, a metodologia proposta por Nguyen *et al.* (2014) foi utilizada e adaptada nas partes não mencionadas pelos autores. Essa metodologia,

⁴ Em consulta com diferentes fabricantes, há o relato de que em função do alto calor de hidratação a utilização do CP V-ARI causa fissuração na fina camada de pasta que envolve os agregados.

já retratada no item 2.7.2, considera que a relação a/c limite é alcançada quando houver uma consistência de pasta suficiente para envolver e conectar os agregados, sem que haja excesso. O método apresentado por Nguyen *et al.* (2014) baseia-se em um estudo experimental, permitindo sua aplicação a qualquer tipo e tamanho de agregado. Para realização do ensaio supracitado, o proporcionamento de cada traço estudado permanece constante no volume de pasta, variando apenas a relação a/c, para teores maiores ou menores.

Nesta abordagem experimental foi utilizada um recipiente metálico, semelhante ao mencionado na ABNT NBR 45 (2006), através de um misturador de argamassa acoplado a uma furadeira, com um tempo de mistura de 3 min, como pode ser observada na Figura 29.

FIGURA 29 - PROCEDIMENTO DE MISTURA MECÂNICA EM BALDE PADRONIZADO (ABNT NBR 45:2006) E MISTURADOR ACOPLADO EM FURADEIRA



Após a mistura, o concreto no estado fresco é vertido sobre uma peneira de abertura imediatamente inferior a faixa granulométrica do agregado utilizado na mistura, sendo estas correspondentes ao conjunto de peneiras da série normal. Assim, o conjunto peneira e concreto é levado a mesa vibratória, por 15 s, permitindo o escoamento da pasta quando em excesso, como pode ser observado na Figura 30a.

Durante a vibração da peneira, caso haja escoamento do excesso de pasta para o recipiente inferior, a relação a/c deve ser reduzida, buscando condições de uma pasta mais consistente. Na situação oposta, isto é, quando não ocorrer escoamento de pasta de cimento para o recipiente inferior, a relação a/c deve ser aumentada. Na Figura 30b pode ser observado o excesso de pasta resultante da

vibração. Destaca-se que a metodologia mencionada foi adaptada nas partes não mencionadas pelos autores, definindo, a frequência de vibração, em mesa vibratória, de 60 Hz.

FIGURA 30 - MÉTODO NGUYEN *ET AL.* (2014) ADAPTADO: (A) CONCRETO ESTADO FRESCO SOBRE A MALHA DA PENEIRA; (B) PASTA DE CIMENTO EM EXCESSO



Desse modo, para cada um dos traços investigados com relação P/Ag, variando em teores de 0,25, 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65, permitiu-se aplicar diferentes relações a/c, como pode ser observado no planejamento experimental da Tabela 7. Nota-se que foram analisados dez traços, sendo cinco para agregados graúdos de fração granulométrica entre 4,8 - 6,3 mm e outros cinco traços para a fração granulométrica entre 6,3 - 9,5 mm. Em todos os casos, a massa de agregado graúdo utilizado foi de 2,5 kg, na condição saturado superfície seca.

TABELA 7 - DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PELO MÉTODO NGUYEN *ET AL.* (2014) ADAPTADO

Traços	Fração granulométrica	Massa de Agregado graúdo (Kg)	Relação Pasta/Agregado
T1	4,8 – 6,3 mm	2,5	0,25
T2		2,5	0,35
T3		2,5	0,45
T4		2,5	0,55
T5		2,5	0,65
T6	6,3 – 9,5 mm	2,5	0,25
T7		2,5	0,35
T8		2,5	0,45
T9		2,5	0,55
T10		2,5	0,65

Destaca-se que para cada um dos traços (T1 a T10) foram realizados um número mínimo de testes (entre 5 e 7) com diferentes relações a/c, iniciando por “tentativa e erro”, até encontrar uma relação que ajude a convergir para a consistência limite do concreto permeável. Buscando uma maior confiabilidade dos resultados, durante a vibração de cada mistura, foram analisadas três amostras por traço. As peneiras utilizadas foram com diâmetros da malha de 2,36 e 4,75 mm, para as frações granulométricas de 4,8 – 6,3 mm e 6,3 – 9,5 mm, respectivamente.

3.2.2 Fase II: Influência da consistência da pasta de cimento

Essa fase objetiva verificar a validade da metodologia utilizada na Fase I quanto ao desempenho do concreto permeável a partir de suas propriedades finais. Para isso, foram produzidos cinco traços com agregados graúdos com fração granulométrica uniforme, 6,3 – 9,5 mm, mantendo o tipo e nível de compactação. Nestes traços, utilizou-se a relação P/Ag de 0,55, com variações na consistência para teores maiores e menores que o limite obtido pela metodologia de Nguyen *et al.* (2014), de 0,30⁵. Desse modo, foram produzidos traços com relações a/c de 0,26, 0,28, 0,30, 0,32 e 0,34.

Na Tabela 8 podem ser observado os cinco traços, em massa, utilizados nesta campanha experimental, com seus respectivos consumos de materiais. A nomenclatura (e.g. CP55HU(30)) abordada faz referência a relação Pasta/Agregado (P/Ag) utilizada em cada traço produzido (CP55 significa um traço com relação P/Ag igual a 0,55), a sigla HU faz referência ao tipo de compactação por haste (H), e a característica do conjunto granular uniforme (U), além da relação a/c, entre parênteses, indicando que este traço tem relação de 0,30.

TABELA 8 - TRAÇOS DE CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES A/C

Traço	Relação P/Ag em massa	Cimento	Brita	a/c	Consumo de brita (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)
CP55HU(26)	0,55	1	2,29	0,26	1273,58	556,13
CP55HU(28)		1	2,33	0,28	1325,45	569,94
CP55HU(30)*		1	2,36	0,30	1306,85	553,35
CP55HU(32)		1	2,40	0,32	1359,11	566,30
CP55HU(34)		1	2,44	0,34	1374,29	564,22

*Traço referência

⁵ A consistência limite obtida, relação a/c de 0,30, para o traço com relação P/Ag de 0,55, está descrita e analisada no item 5.11 no tópico RESULTADOS.

Todos os traços de concreto permeável foram produzidos em betoneira de 320 litros, como pode ser retratado na Figura 31. O processo de mistura do concreto permeável seguiu as recomendações de Schaefer *et al.* (2006): (1) lançamento de todo agregado e parte do cimento (<5%), sendo misturado por um minuto; (2) o restante do cimento e a totalidade da água foram adicionados, sendo misturados por três minutos; (3) foi realizado a homogeneização manual do material preso na parede da betoneira e manteve-se em repouso durante três minutos; (4) foi misturado novamente por três minutos.

Após a confecção do concreto foi realizada uma inspeção visual e verificou-se que a relação a/c utilizada deixou os agregados inteiramente cobertos com pasta e a pasta não segregou durante o processo de moldagem, seguindo as recomendações de Tennis, Lemin e Akers (2004). Destaca-se que o concreto permeável é suscetível a mudanças bruscas em suas características com pequenas alterações de procedimentos, de variações de matérias ou de operador, necessitando de um controle rigoroso na metodologia adotada, garantindo a qualidade dos resultados.

FIGURA 31 – PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL



A moldagem foi realizada pelo lançamento do concreto no interior do molde cilíndrico (10 x 20 cm) em três camadas, sendo que cada camada foi compactada com 25 golpes com haste metálica. Durante o processo de moldagem há uma particularidade que deve ser destacada: Após a compactação das três camadas, conforme estipulado, sobra um espaço de aproximadamente 2 cm até a superfície

superior do molde, que deve ser completada com concreto. Para isso, a camada restante foi adicionada com auxílio de uma “pá de pedreiro”, com o lançamento na vertical e posterior pressão sobre a superfície, sem exercer efeito cisalhante, permitindo um acabamento sem tampar os poros superiores, que poderiam ficar impermeáveis caso o acabamento fosse realizado numa situação semelhante ao concreto convencional.

Os CPs produzidos nesta fase do programa experimental foram caracterizados segundo os ensaios de densidade no estado fresco e endurecido; porosidade total e efetiva; resistência à compressão; caracterização das propriedades hidráulicas do escoamento⁶, como pode ser observado na Tabela 9.

TABELA 9 – QUANTITATIVOS DOS CORPOS DE PROVA: FASE II

Traço	Dens. est. Fsc.	Dens. est. End.	Porosidade total	Porosidade efetiva	Prop. Hidráulicas	Res. à comp.
CP55HU(26)	6	6	6	6	3	6
CP55HU(28)	6	6	6	6	0	6
CP55HU(30)	6	6	6	6	6	6
CP55HU(32)	6	6	6	6	0	6
CP55HU(34)	6	6	6	6	3	6
Data do ensaio	Durante moldagem	14° dia	14° dia	15° dia	21° dia	28° dia

Destaca-se que antes desta abordagem metodológica, e deste planejamento experimental, outros ensaios relativos as propriedades hidráulicas já haviam sido realizadas, com conclusões derivativas retratando características únicas e particulares de cada CP de concreto permeável em relação ao seu escoamento. Não há dúvidas de que a maior amostragem permite obter, estatisticamente, correlações mais realistas do traço estudado, no entanto, neste estudo de meios porosos, a amostragem não é suficiente para definir, dentro de uma média, a particularidade de cada meio poroso. Visto isso, algumas abordagens experimentais tiveram uma menor amostragem, reduzindo o alto consumo de água e de materiais para cada ensaio⁷.

⁶ Procedimentos laboratoriais descritos no subitem 3.3.3 e resultados no subitem 4.2.

⁷ Análise estatística sobre a amostragem utilizada na caracterização das propriedades do concreto permeável (Subitem 5.3).

3.2.3 Fase III: Influência do volume de pasta de cimento

Essa fase objetiva verificar a influência da relação P/Ag nas propriedades do concreto permeável, a partir de suas propriedades finais. Para isso, foram produzidos cinco traços com agregados graúdos com faixa granulométrica uniforme, em 6,3 – 9,5 mm, mantendo o tipo e nível de compactação. Nestes cinco traços, utilizou-se a relação P/Ag de 0,25, 0,35, 0,45, 0,55 e 0,65 mantendo a relação a/c constante e igual a 0,30.

Destaca-se que o aumento progressivo do volume de pasta, além da relação P/Ag de 0,65, impossibilita a produção de concretos com alguma capacidade permeável, em função da baixa porosidade efetiva. Do mesmo modo que reduzidos volumes de pasta, com P/Ag inferiores a 0,25, produz um concreto com desempenho insatisfatório para as solicitações mecânicas encontradas nas aplicações do concreto permeável. Assim, na Tabela 10 pode ser observado os traços, em massa, utilizados nesta campanha experimental, com seus respectivos consumos de materiais.

TABELA 10 – TRAÇO DO CONCRETO PERMEÁVEL: VARIAÇÕES DA RELAÇÃO P/AG

Traço	Relação P/Ag em massa	Traço em massa			Consumo de brita (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)
		Cimento	Brita	a/c		
CP25HU(30)	0,25	1	5,20	0,30	1425,49	274,01
CP35HU(30)	0,35	1	3,71		1411,77	380,39
CP45HU(30)	0,45	1	2,9		1305,91	452,26
CP55HU(30)	0,55	1	2,4		1306,85	553,35
CP65HU(30)	0,65	1	2,0		1218,81	609,40

Para realização dos ensaios foram produzidos corpos de prova cilíndricos (com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) e ensaiados conforme descrição da Tabela 11, a partir da densidade no estado fresco e endurecido; porosidade total e efetiva; resistência à compressão; caracterização das propriedades hidráulicas do escoamento.

TABELA 11 – QUANTITATIVOS DOS CORPOS DE PROVA: FASE III

Traço	Dens. est. Fresco	Dens. est. End.	Porosidade total	Porosidade efetiva	Prop. Hidráulica	Res. à comp.
CP25HU(30)	6	6	6	6	6	6
CP35HU(30)	6	6	6	6	6	6
CP45HU(30)	12	12	12	12	12	7
CP55HU(30)	12	12	12	12	12	7
CP65HU(30)	12	12	12	12	12	7
Data do ensaio	Durante a moldagem	14° dia	14° dia	15° dia	21° dia	28° dia

Foram produzidos 12 CPs para as três primeiras misturas elaboradas CP45HU(30), CP55HU(30) e CP65HU(30) e, posteriormente, para os traços CP25HU(30) e CP35HU(30) foram 6 CPs, devido às limitações de fornecimentos das frações granulométricas. A análise e comparação dos resultados experimentais demonstraram que a redução da quantidade de CPs são viáveis devido à baixa dispersão⁸. Destaca-se que os mesmos CPs utilizados nos ensaios mecânicos de resistência à compressão (e resistência à tração, apresentados em outra abordagem no Apêndice 4) foram, previamente, utilizados na determinação da densidade (estado fresco e endurecido), porosidade conectada e total (estado fresco e endurecido) e nos ensaios de permeabilidade, na ordem cronológica apresentada na Tabela 11.

3.2.4 Fase IV: Velocidade de propagação da onda ultrassônica

Para cada CP de concreto permeável resultante produzido na Fase III foi determinado o tempo de propagação da onda ultrassônica. Para realização dos ensaios foram utilizados corpos de prova cilíndricos (com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) conforme descrição da Tabela 12, e todos CPs tiveram as medições realizadas no 14° dia após a moldagem.

⁸ Análise estatística sobre a amostragem utilizada na caracterização das propriedades hidráulicas do concreto permeável (Subitem 5.3)

TABELA 12 – QUANTITATIVO DOS CORPOS DE PROVA: FASE IV

Traços	Pasta/ Agregado	Amostras para determinação da VPU
CP25HU(30)	0,25	6
CP35HU(30)	0,35	6
CP45HU(30)	0,45	12
CP55HU(30)	0,55	12
CP65HU(30)	0,65	12

3.3 ENSAIOS

As diferentes misturas de concreto permeável ensaiadas nas fases II, III e IV foram caracterizadas em relação a suas propriedades: densidade e porosidade no estado fresco; densidade e porosidade no estado endurecido, porosidade efetiva, propriedades hidráulicas; resistência à compressão; e velocidade de propagação da onda ultrassônica.

3.3.1 Densidade e porosidade no estado fresco

A densidade ($D_f, kg/m^3$) e porosidade ($P_f, \%$) do concreto permeável no estado fresco foram determinados através dos procedimentos descrito pela ASTM C1688 (2014). A densidade no estado fresco é mensurada pela divisão da massa líquida do concreto efetivamente adicionada no molde metálico (M_c) em relação ao volume do molde (V_m), descrita na Equação 32.

$$D_f = \frac{M_c}{V_m} \quad (32)$$

A porosidade do concreto no estado fresco é descrita pela relação entre a densidade (D_f) experimental e a densidade teórica ($T = M_s/V_s, kg/m^3$), onde M_s corresponde a massa seca de todos os materiais dosados e V_s a soma dos volumes absolutos de cada material, obtido pela sua massa específica, descrita através da Equação 33.

$$P_f = \left(\frac{T - D_f}{T} \right) \cdot 100 \quad (33)$$

3.3.2 Densidade e porosidade no estado endurecido

A densidade ($D_e, kg/m^3$) e porosidade total ($P_t, \%$) no estado endurecido foram mensuradas de acordo com o Método A, descritas pela ASTM C1754/C1754M-12 (2012), e obtidas através destas Equação 34 e 35, respectivamente. Sendo A (kg), massa seca do CP, K' , valor constante 1274240 in SI, D (mm), diâmetro do CP, L (mm), comprimento do CP, B (kg), massa submersa do CP. Esta abordagem é realizada por diversos autores, seguindo o método de deslocamento de água baseado no princípio de flutuabilidade de Arquimedes (MONTES; HASELBACH, 2006; ONG; JAGADEESH; SU, 2020; LADERLE *et al.*, 2019; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; PIERALISI; CAVALARO; AGUADO, 2017; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; KEVERN; NOWASELL, 2018; DEBNATH; SARKAR, 2019; SANDOVAL *et al.*, 2020).

$$D_e = \left[\left(\frac{K' \cdot (A)}{D^2 \cdot L} \right) \right] \quad (34)$$

$$P_t = \left[1 - \left(\frac{K' \cdot (A - B)}{\rho_w \cdot D^2 \cdot L} \right) \right] \cdot 100 \quad (35)$$

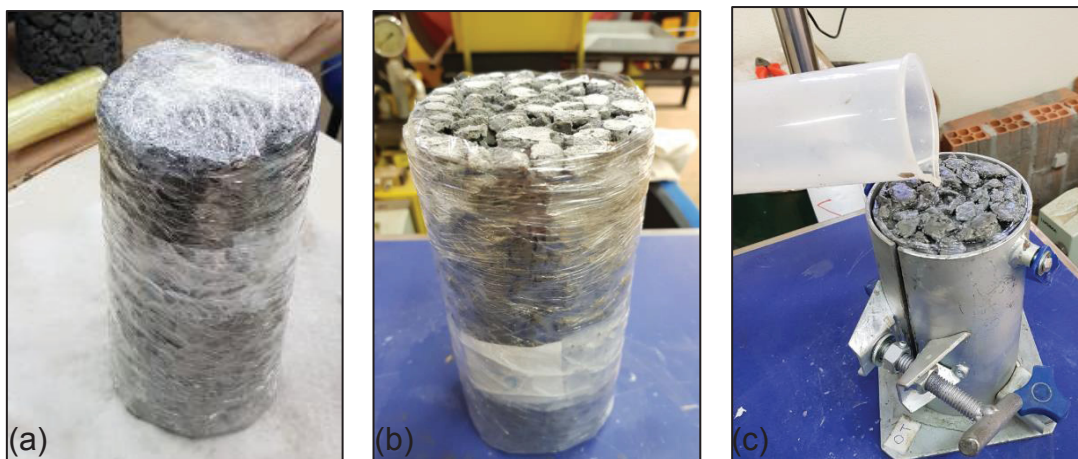
O procedimento proposto por Neithalath *et al.* (2006; 2010), recomendado pela ACI 522R-10 (2010) e utilizado por outros autores (DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010; KUO; LIU; SU, 2013; SANDOVAL *et al.* 2017) foi adaptado para determinação da porosidade efetiva ($P_e, \%$). Neste procedimento, a massa de água (M_w, kg) necessária para preencher os vazios da amostra de concreto permeável é convertido para volume de poros efetivos. O CP de concreto permeável foi submerso em água por 24 h para saturar a matriz da pasta. Após a remoção da água, a superfície da amostra foi enxuta. O CP saturado foi então confinado, garantindo a estanqueidade em sua base e na lateral. Para isso, o CP foi inserido em um molde metálico, para posterior adição de água até preencher seus poros efetivos. A conversão é expressa

pela Equação 36, onde ρ_w (kg/m^3) é a massa específica da água a 25° C e V_M (m^3) é o volume do molde cilíndrico.

$$P_e = \frac{M_w}{\rho_w \cdot V_M} \cdot 100 \quad (36)$$

Na Figura 32 podem ser observados os procedimentos laboratoriais realizados para obter a porosidade efetiva. Na Figura 32a e 32b podem ser observados o CP de concreto permeável envolvido em um papel filme, em sua base e lateral, e, posteriormente, com fita adesiva, garantindo um melhor confinamento e limitando o escoamento pela sua superfície lateral e na base, deixando-o estanque. Na Figura 32c, o CP de concreto permeável foi inserido no interior do molde metálico, garantindo um melhor confinamento de suas superfícies, e servindo de sustentação para o elemento testado, para posterior adição de água. Destaca-se que em todos os ensaios foi utilizada uma proveta graduada, previamente cheia com 1000 ml de água.

FIGURA 32 – ENSAIO DE POROSIDADE EFETIVA: (A; B) CP CONFINADO COM PAPEL FILME E FITA ADESIVA (C) LANÇAMENTO DE ÁGUA NO CP CONFINADO EM MOLDE METÁLICO

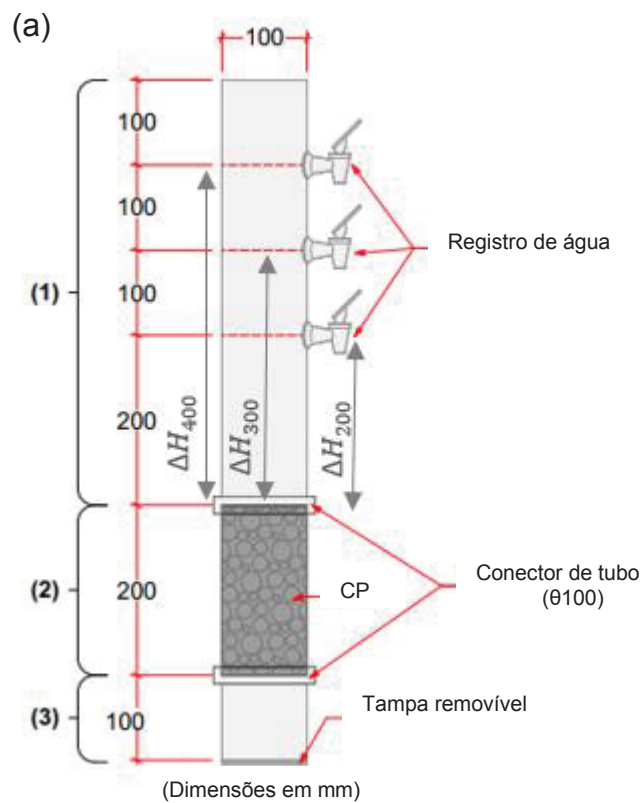


3.3.3 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas do concreto permeável foram determinadas através de um permeâmetro de carga constante, como pode ser observado na Figura 33. O permeâmetro foi projetado para que sejam realizados ensaios em três diferentes cargas hidráulicas, variando em 20, 30 e 40 cm de coluna de água (pressões estáticas

de 1,96, 2,94 e 3,92 kPa, respectivamente, para água a 20 °C). O permeâmetro elaborado é composto por três partes, como pode ser observado na Figura 33a: (1) um tubo superior, utilizado para controlar o nível de água (ΔH); (2) a amostra, que foi envolvida em filme de PVC e fita adesiva para reduzir o fluxo de água ao longo da lateral da amostra; e (3) um tubo inferior para controlar o fluxo de água.

FIGURA 33 – PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE



O procedimento utilizado para montar o teste foi o mesmo para todos os corpos de prova, sendo divididos em três etapas:

- Primeiro, o CP foi envolvido com papel filme e fita adesiva de modo a isolar a passagem de água em sua lateral (Figura 33b);
- Posteriormente os tubos foram encaixados ao CP (Figura 33c). A mesma fita adesiva foi utilizada para envolver a amostra e fixar os tubos;
- Em seguida, o conjunto de tubos e o CP foram fixados por meio de três braçadeiras ajustáveis na parede para garantir a verticalidade (Figura 33d).

O procedimento de ensaio para determinar a vazão do concreto permeável pode ser dividido em três etapas, sendo estas realizadas para cada carga hidráulica fornecida pelo permeâmetro, correspondente aos níveis de água (ΔH) de 20, 30 e 40 cm:

- Utilizando-se de uma mangueira flexível, inicia-se o lançamento de água na abertura superior do permeâmetro. Quando o nível de água atinge a carga hidráulica desejada, controla-se a vazão através do registro de saída, correspondente a cada nível ensaiado (ΔH), mantendo-o constante;
- Posteriormente, mantém-se o nível de água pelo período de 60 s para o escoamento da água através do permeâmetro, passando pelo CP de concreto permeável e caindo sobre um recipiente embaixo do tubo inferior;
- Após o tempo de 60 s, o recipiente com água é retirado e imediatamente pesado, permitindo determinar a vazão (Q).

Assim, o gradiente hidráulico (i) e a velocidade média do fluxo (q) foram estimados a partir das Equações 37 e 38, respectivamente. Nessas equações, L representa a altura da amostra, Q representa a taxa de fluxo (calculada por $Q = \Delta V / \Delta t$) e A representa a área da seção transversal do CP.

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (37)$$

$$q = \frac{Q}{A} \quad (38)$$

3.3.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada através do rompimento de CPs cilíndricos conforme estabelece a ABNT NBR 5739 (2007), sendo a idade do ensaio de 28 dias, mantendo velocidade de carregamento constante e correspondente a 0,30 MPa/s. O ensaio foi realizado em uma Máquina Universal de Ensaio, modelo TIME WDW 300E. A regularização da superfície, inferior e superior, do CP de concreto permeável é necessária a fim de homogeneizar a transmissão dos esforços de compressão, para isso realizou-se o capeamento com gesso, como pode ser observado em uma de suas superfícies na Figura 34.

FIGURA 34 – CAPEAMENTO COM GESSO NO CP DE CONCRETO PERMEÁVEL



3.3.5 VPU

A determinação da VPU nos CPs de concreto permeável foi realizada utilizando um aparelho de ultrassom portátil da marca PROCEQ, seguindo as recomendações da ASTM C597 (2016). O ensaio foi realizado através da leitura por transmissão direta na longitudinal (20 cm de comprimento), com frequência de vibração da onda ultrassônica de 24 kHz e com um ajuste no fator de amplificação do receptor de 500, correspondente a 54 dB.

A configuração do teste consistiu em duas placas com furos para apoiar os transdutores para aplicação direta, assegurando que os transdutores estavam concêntricos ao CP, como retrata a Figura 35. Além disso, para cada CP foram realizadas três leituras. A superfície da amostra de concreto permeável é normalmente

irregular devido à baixa relação P/Ag, assim foi aplicada uma camada espessa de gel entre as superfícies da amostra e os transdutores, conforme recomendação de Chamdrappa e Biligiri (2016c).

FIGURA 35 – ENSAIO PELO MÉTODO DE ULTRASSOM



4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 FASE I

Este item apresenta os resultados da consistência de pasta limite obtidos a partir da metodologia adaptada de Nguyen *et al.* (2014), permitindo extrair interpretações sobre aspectos reológicos do concreto permeável no estado fresco. Os ensaios realizados para cada traço tiveram particularidades quanto aos testes necessários para obtenção da relação a/c limite, uma vez que cada traço, com diferentes proporções de materiais, tem influência direta na sua consistência.

Buscando maior clareza de como se operacionalizou os ensaios, assim como os resultados obtidos, uma situação experimental foi descrita para o Traço T1: para obter a consistência limite para o traço denominado **T1** (relação P/Ag de 0,25) foram necessários realizar sete testes, como pode ser observado na Tabela 13, sendo o Traço - Teste “**T1-6**” o resultante da metodologia aplicada, com relação a/c de 0,52, sendo este valor o limitante para não ter excesso/escoamento de pasta. Para cada teste realizado foi uma nova mistura de concreto, e se diferenciavam das outras pelo incremento de água, com a relação a/c variando 0,02 a cada teste, intervalo suficiente para essa análise. Destaca-se que após cada um dos testes, ou seja, após a vibração das peneiras, era verificado visualmente se houve escoamento do excesso de pasta embaixo da peneira utilizada. Essa abordagem se repetiu para os demais traços, de T1 a T10.

TABELA 13 - TRAÇOS TESTES DE CONSISTÊNCIA REFERÊNTES AO TRAÇO 1

TRAÇO-TESTE	Relação Pasta/Agregado	Massa de cimento (kg)	Massa de Agregado (kg)	Vol. de água (l)	Traço em massa			Escoamento de Pasta
					Cimento	Agregado	Relação a/c	
T1-1	0,25	0,4401	2,5	0,185	1	5,6805	0,42	Não
T1-2	0,25	0,4340	2,5	0,191	1	5,7604	0,44	Não
T1-3	0,25	0,4281	2,5	0,197	1	5,8398	0,46	Não
T1-4	0,25	0,4223	2,5	0,203	1	5,9200	0,48	Não
T1-5	0,25	0,4170	2,5	0,209	1	5,9952	0,50	Não
T1-6	0,25	0,4112	2,5	0,214	1	6,0798	0,52	Não
T1-7	0,25	0,4060	2,5	0,219	1	6,1576	0,54	Sim

Os resultados das relações a/c para todos os traços estão resumidos na Tabela 14, e são apresentados em função da característica granulométrica dos

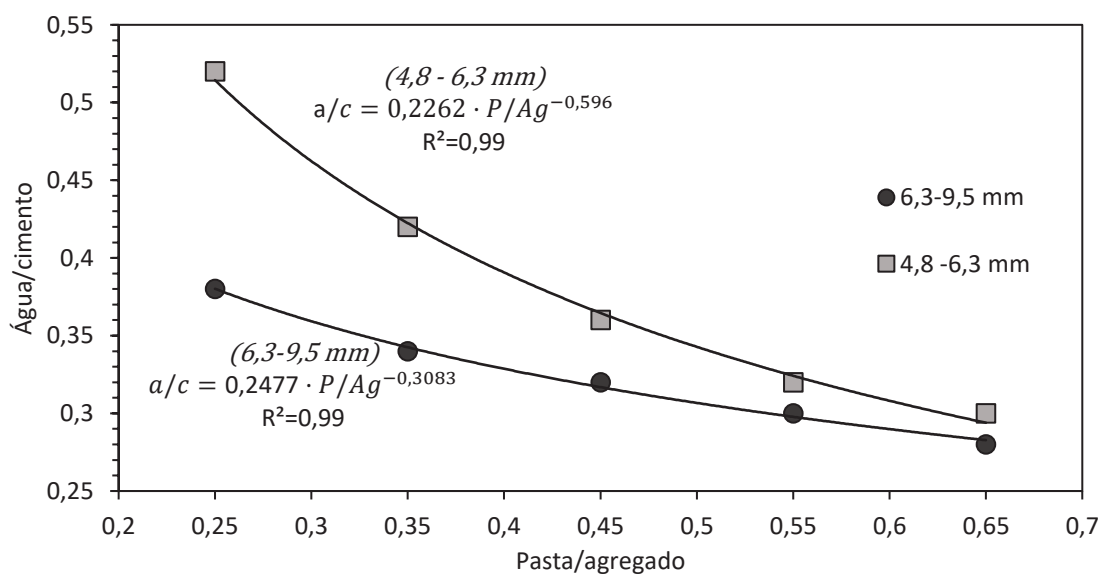
agregados e da relação P/Ag. Destaca-se que nesta abordagem experimental foram realizados 61 ensaios de consistência, variando entre 5 a 7 testes/tentativas por traço.

TABELA 14 - DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO PELO MÉTODO NGUYEN *et al.* (2014) ADAPTADO

Traços	Fração granulométrica	Relação Pasta/Agregado	Relação a/c
T1	4,8 – 6,3 mm	0,25	0,52
T2		0,35	0,42
T3		0,45	0,36
T4		0,55	0,32
T5		0,65	0,30
T6	6,3 – 9,5 mm	0,25	0,38
T7		0,35	0,34
T8		0,45	0,32
T9		0,55	0,30
T10		0,65	0,28

Na Figura 36 pode ser observado graficamente o comportamento obtido com a relação a/c limite para cada relação P/Ag, considerando as duas frações granulométricas, 4,8 - 6,3 mm e 6,3 - 9,5 mm.

FIGURA 36 - RELAÇÃO A/C LIMITE PARA DIFERENTES RELAÇÕES P/AG EM DUAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS



A metodologia utilizada garante uma padronização da consistência em cada um dos dez traços estudados, de modo que em nenhum destes tenha falta ou excesso de pasta. Como pode ser observado na Figura 36, a metodologia considera as principais variáveis que podem influenciar em suas propriedades finais: relação a/c, relação P/Ag e característica física dos agregados. Destaca-se que é um método promissor na definição de critérios para dosagem do concreto permeável, não no sentido de que seus resultados sejam os melhores e indiscutíveis para produção do concreto permeável, mas por apresentar-se como uma ferramenta que direciona na obtenção de uma consistência para produção do concreto permeável. Ainda, destaca-se que as relações a/c obtidas estão dentro de intervalos usuais da literatura (*vide Tabela 1*).

As conclusões derivativas deste estudo foram elencadas a partir de dois comportamentos característicos. O primeiro refere-se aos traços com fração granulométrica de menor diâmetro, que demandaram maiores relações a/c em relação a de diâmetro superior. Dentre as possíveis explicações para tal fenômeno, referem-se que a fração granulométrica de menor diâmetro possui maior superfície específica, o que demanda maior volume de pasta para envolvê-los. Assim, conseqüentemente, na fração granulométrica de diâmetro superior, um maior volume de pasta se distribui na sua superfície, garantindo maior espessura e menor atrito entre os agregados, o que promove, maior capacidade de adensamento.

Dentre outras hipóteses para o comportamento obtido, de menores relações a/c para a fração entre 6,3 – 9,5 mm, está relacionado a influência do formato do agregado, que é mais esférico que a fração 4,8 – 6,3 mm, aumentando a capacidade de rolamento e adensamento da mistura.

Na Tabela 15 pode ser observado a espessura de pasta que envolve o agregado gráúdo obtida para cada traço do estudo, fundamentando a afirmação supracitada, onde os traços com fração granulométrica de maior diâmetro obtiveram uma maior espessura de pasta.

TABELA 15 - ESPESSURA DE PASTA DOS TRAÇOS T1 A T10

Traços	Fração granulométrica	Relação Pasta/Agregado	Volume de pasta (m³)	Superfície específica do conjunto granular (m²)	Espessura de pasta (mm)
T1	4,8 – 6,3 mm	0,25	$5,75 \times 10^{-4}$	0,852	0,56
T2		0,35	$7,99 \times 10^{-4}$	0,852	0,73
T3		0,45	$1,02 \times 10^{-3}$	0,852	0,89
T4		0,55	$1,25 \times 10^{-3}$	0,852	1,04
T5		0,65	$1,47 \times 10^{-3}$	0,852	1,18
T6	6,3 – 9,5 mm	0,25	$5,70 \times 10^{-4}$	0,585	0,81
T7		0,35	$7,95 \times 10^{-4}$	0,585	1,07
T8		0,45	$1,02 \times 10^{-3}$	0,585	1,30
T9		0,55	$1,25 \times 10^{-3}$	0,585	1,52
T10		0,65	$1,47 \times 10^{-3}$	0,585	1,72

Para caracterização física de cada fração granulométrica, e determinação da espessura de pasta do traço, adotou-se a seguinte metodologia:

1. Selecionar 200 agregados (n) da fração granulométrica e realizar a leitura da sua respectiva massa (M , kg). Conhecida a massa específica ($\rho = M/V$, kg/m³- Tabela 6), obtém-se o volume (V_a , m³) correspondente aos 200 agregados e, conseqüentemente, o volume médio de um agregado ($V_{a,u}$, m³), permitindo, assim, obter seu raio médio (r_m , m), como pode ser observado nas Equações 39, 40 e 41, respectivamente.

$$V_a = \frac{M}{\rho} \quad (39)$$

$$V_{a,u} = \frac{V_a}{n} \quad (40)$$

$$r_m = \left(\frac{3 \cdot V_{a,u}^3}{4 \cdot \pi} \right)^{1/3} \quad (41)$$

2. A partir disso, sabendo-se que os traços produzidos nesta abordagem experimental possuem uma massa definida em 2,5 kg, é possível determinar o volume

correspondente de agregados ($V_{a,t}$, m³) e, posteriormente, o número de agregados pertencentes a esse conjunto granular (n_t), como pode ser observado nas Equações 42 e 43, respectivamente.

$$V_{a,t} = \frac{2,5}{\rho} \quad (42)$$

$$n_t = \frac{V_{a,t}}{V_{a,u}} \quad (43)$$

3. Considerando-se que todos agregados são esféricos, a partir de seu raio médio (r_m , m), e conhecido o volume de pasta de cada traço (V_p , m³), assim como o número de agregados pertencentes a esse conjunto granular (n_t), é possível estimar o volume de pasta por agregado e, conseqüentemente, a partir de uma simplificação, a espessura de pasta (E_p , mm), como pode ser observado nas Equações 44 e 45, respectivamente.

$$\frac{V_p}{n} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot (r + E_p)^3}{3} - \frac{4 \cdot \pi \cdot (r)^3}{3} \right) \quad (44)$$

$$E_p = 1000 \cdot \left[\left(\frac{V_p}{n} + \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \right) - \frac{3}{4 \cdot \pi} \right]^{1/3} - r \quad (45)$$

O segundo comportamento obtido refere-se que para a mesma faixa granulométrica, à medida que as relações P/Ag aumentaram, menores as relações a/c necessárias. Como era de se esperar, o volume de pasta influencia diretamente na consistência do concreto permeável, de modo que o comportamento obtido, nas duas frações granulométricas, converge para relações a/c próximas, e quando isto ocorre, neste caso para relações P/Ag acima de 0,65, a consistência da mistura já não é tão influenciada pelas diferentes propriedades físicas entre as duas frações granulométricas. Estudos com maiores relações P/Ag saem do escopo da pesquisa,

pois já não mais produziram concretos com uma porosidade efetiva para escoamento, como foi constatado ao produzir um CP teor da relação P/Ag de 0,75 (relação a/c de 0,30), com aspecto semelhante a um concreto convencional.

Utilizando-se do método de *stepwise*, as variáveis significativas foram selecionadas, e foram submetidas a uma análise de resíduos para verificar se as suposições do modelo foram atendidas, como normalidade e variância constante, como pode ser observado na Tabela 16. Observa-se que a relação P/Ag foi significativa ao nível de 5% para modelar a relação a/c, com alta correlação entre as variáveis.

TABELA 16 - MÉTODO STEPWISE-ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO A/C E P/AG

Faixa	Parâmetros	Estimado	DP	p-valor
4,8-6,3 mm	<i>d</i>	0,2262	4×10^{-3}	<0,001
	<i>e</i>	-0,5960	19×10^{-3}	<0,001
6,3 – 9,5 mm	<i>d</i>	0,2477	3×10^{-3}	<0,001
	<i>e</i>	-0,3083	12×10^{-3}	<0,001
Modelo		$a / c = d \cdot (P/Ag)^e$		

As relações a/c obtidas neste estudo são semelhantes ao observado na literatura do concreto permeável, com intervalos variando de 0,3 a 0,55 (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017 e NRMCA, 2004), o que traz confiabilidade a aplicação do método adaptado de Nguyen *et al.* (2014). Destaca-se que esta abordagem experimental é inédita nos estudos de concreto permeável, uma vez que verificou a influência das relações P/Ag, relações a/c e das características físicas dos agregados na consistência do concreto permeável, o que deve contribuir para um projeto de dosagem.

4.2 FASE II

Na Tabela 17 pode ser observado um resumo das principais propriedades do concreto permeável produzidos com diferentes relações a/c (0,26, 0,28, 0,30, 0,32 e 0,34), com dados relativos à porosidade total e efetiva, densidade no estado fresco e endurecido, e resistência à compressão, com seus respectivos desvios padrão.

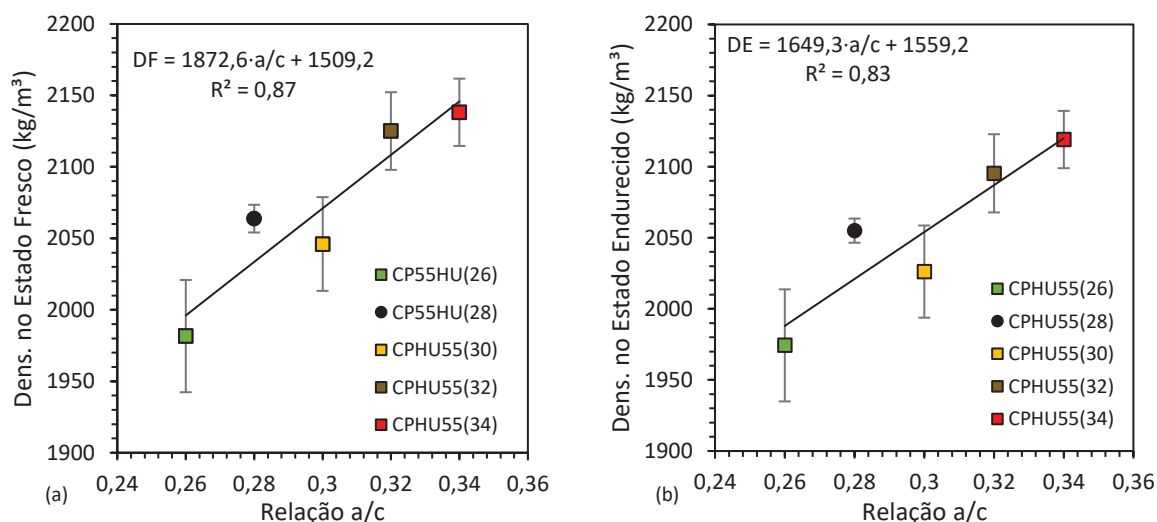
TABELA 17 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES A/C

Traço	Densidade no est. Fresco (kg/m ³) (σ)	Densidade no est. Endurecido (kg/m ³) (σ)	Porosidade (%) (σ)		Resistência à compressão (MPa) (σ)	Propriedades hidráulicas: Vazão (l/s) (σ)		
			Total	Efetiva		ΔH: 0,20 m	ΔH: 0,30 m	ΔH: 0,40 m
CP55HU(26)	1981,59 (39,26)	1974,31 (39,39)	23,17 (1,76)	17,20 (1,44)	10,05 (1,48)	0,092 (0,004)	0,106 (0,004)	0,119 (0,005)
CP55HU(28)	2063,78 (9,69)	2054,98 (8,49)	19,72 (0,30)	13,72 (0,52)	10,56 (0,77)	*	*	*
CP55HU(30)	2046,04 (32,80)	2026,20 (32,41)	20,97 (1,62)	16,89 (1,20)	10,65 (1,07)	0,056 (0,016)	0,064 (0,018)	0,072 (0,021)
CP55HU(32)	2125,1 (27,15)	2095,3 (27,50)	17,25 (1,58)	10,95 (0,23)	13,18 (1,24)	*	*	*
CP55HU(34)	2138,19 (23,54)	2119,07 (20,15)	15,17 (1,10)	10,55 (1,26)	19,20 (1,80)	0,036 (0,008)	0,041 (0,010)	0,045 (0,011)

*Não realizado

Na Figura 37 pode ser observado a influência da relação a/c na densidade do concreto permeável. Nota-se na Figura 37a e 37b que a regressão linear possui alta correlação entre as variáveis relação a/c e densidade no estado fresco ($R^2=0,87$), e no estado endurecido ($R^2=0,83$), respectivamente.

FIGURA 37 – RELAÇÃO A/C E DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (A) E NO ESTADO ENDURECIDO (B)



Para análise da densidade no estado fresco, as amostras entre os traços CP55HU(28) e CP55HU(30), CP55HU(28) e CP55HU(32), CP55HU(32) e CP55HU(34) são estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,051$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 0,005$. Para análise da densidade no estado endurecido, as amostras entre

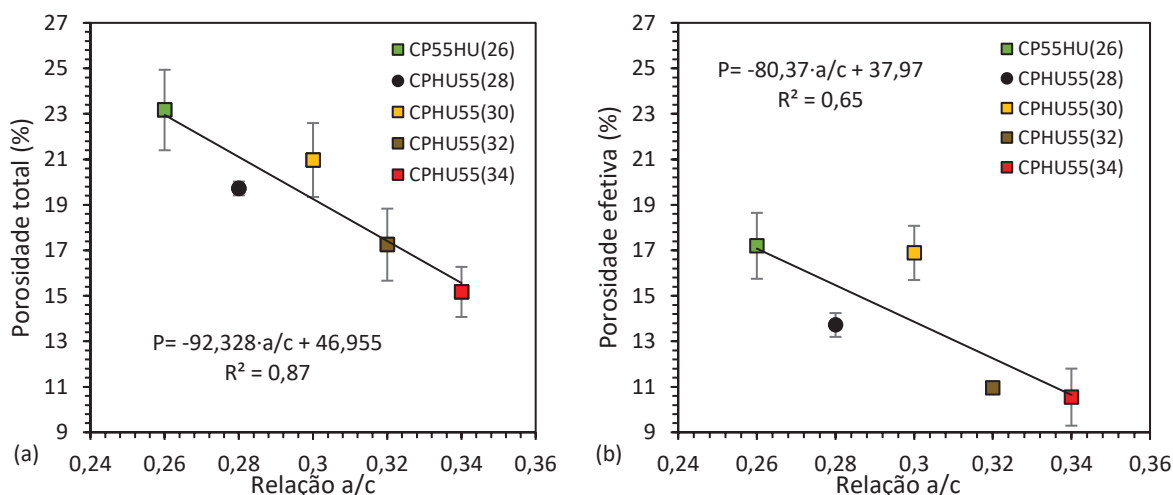
os traços CP55HU(28) e CP55HU(30), CP55HU(28) e CP55HU(32), CP55HU(32) e CP55HU(34) permaneceram estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com $p\text{-valor} \geq 0,33$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com $p\text{-valor} \leq 0,0189$.

De modo geral, nota-se a alta sensibilidade do concreto permeável a pequenas variações na consistência da pasta, promovendo uma amplitude na densidade em mais de 200 kg/m^3 para ambos os casos. Chandrappa e Biligiri (2016) observaram semelhante comportamento, onde o aumento da relação a/c , aumenta o grau de lubrificação entre os agregados, o que auxilia na maior densificação da mistura.

Além disso, nota-se um alto desvio padrão entre os CPs do mesmo traço, reforçando que cada CP de concreto permeável é resultando de um processo aleatório e único, e suas propriedades dependem não apenas do proporcionamento dos materiais, mas também do processo de compactação, sendo que cada CP é diferente dos demais, embora ainda passível de classificação dentro de um intervalo de comportamento.

Na Figura 38 pode ser observado a influência da relação a/c na porosidade do concreto permeável. Nota-se na Figura 38a e 38b que a regressão linear possui alta correlação entre as variáveis relação a/c e porosidade total ($R^2=0,87$), e porosidade efetiva ($R^2=0,65$), respectivamente.

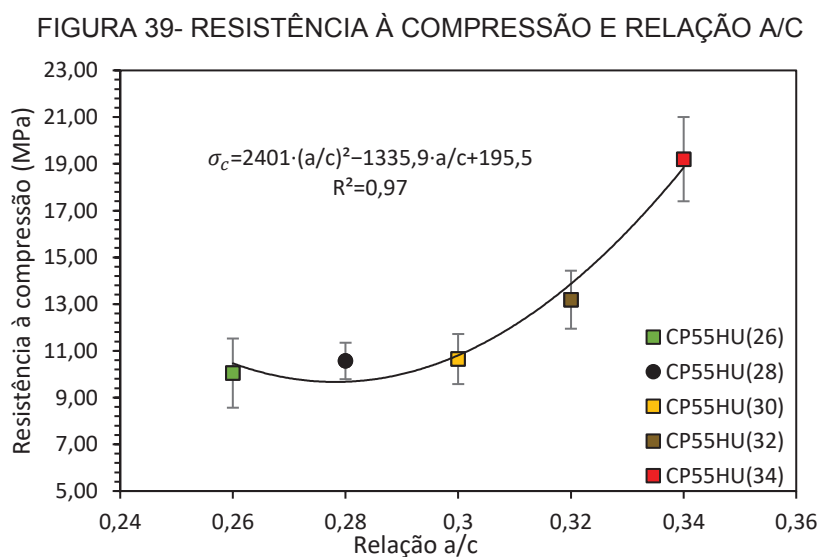
FIGURA 38 – RELAÇÃO A/C E POROSIDADE TOTAL (A) E POROSIDADE EFETIVA (B)



Para análise da porosidade total, as amostras entre os traços CP55HU(28) e

CP55HU(30), CP55HU(28) e CP55HU(32), CP55HU(32) e CP55HU(34) são estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,154$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 0,043$. Para análise da porosidade efetiva, as amostras entre os traços CP55HU(26) e CP55HU(30), CP55HU(32) e CP55HU(34) são estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,9811$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 0,015$. De modo geral, nota-se a alta sensibilidade do concreto permeável a pequenas variações na consistência da pasta, promovendo uma considerável amplitude nos valores de porosidade total e efetiva, com variações de até 8% para ambos os casos. Tal comportamento, das menores porosidade, para maiores relações a/c, também é observado por Debnath e Sankar (2019).

O desempenho mecânico, caracterizado pela resistência à compressão, está intimamente relacionado com a relação a/c, com alta correlação entre os resultados ($R^2=0,88$). A equação polinomial do segundo grau foi adotada em função da maior correlação entre as variáveis analisadas. Fica evidente que a relação a/c influencia na resistência à compressão, no entanto de modo indireto. A explicação física para tal fenômeno está, sem dúvidas, atrelada a macroporosidade resultante desta consistência. Esta relação pode ser observada na Figura 39.



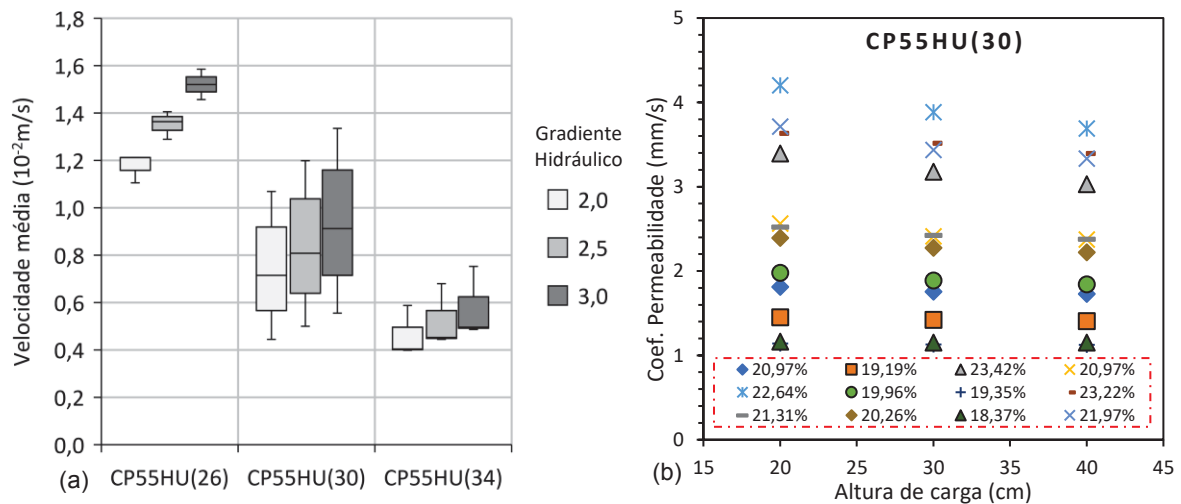
A resistência à compressão entre os traços CP55HU(26) e CP55HU(28), CP55HU(26) e CP55HU(30), CP55HU(28) e CP55HU(30), CP55HU(28) e

CP55HU(32), CP55HU(30) e CP55HU(32) foram estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com $p\text{-valor} \geq 0,062$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com $p\text{-valor} \leq 0,014$.

De modo geral, nota-se que à medida que a consistência da pasta aumentou, a sua resistência à compressão também aumentou, seguindo a mesma tendência observada por Abrams (1918) para concreto de consistência seca. A análise dos resultados demonstra que embora haja um notável desvio padrão entre os traços estudados, o que era de se esperar, pela característica do material poroso, a resistência à compressão sofre influência significativa para as relações a/c maiores que 0,30. Tal comportamento também foi observado por Lian e Zhuge (2010), que obtiveram aumento na resistência à compressão ao variar a relação a/c de 0,30 para 0,34.

A partir dos ensaios de permeabilidade, pode ser observado na Figura 40a as velocidades médias de escoamento para três gradientes hidráulicos (altura de carga de 20, 30 e 40 cm) em cada um dos CPs estudados (CP55HU(26), CP55HU(30) e CP55HU(34)) com seus respectivos desvios padrão, representado por *boxplot* para cada traço de concreto permeável. A partir das velocidades do escoamento, utilizou-se a equação linear de Darcy para obter seus respectivos coeficientes de permeabilidade ($K, L/T$), como pode ser observado na Figura 40b, exemplificado através de um dos traços estudados (CP55HU(30)).

FIGURA 40- VELOCIDADE MÉDIA DO CONCRETO PERMEÁVEL EM DIFERENTES GRADIENTES HIDRÁULICOS (A) E RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E ALTURA DE CARGA COM ABORDAGEM DARCIANA: CP55HU(30)



Como esperado, a velocidade do fluido aumenta com o gradiente hidráulico aplicado. Nota-se que os traços com mesma relação P/Ag tiveram distintos escoamentos em função das diferentes consistências, uma vez que resultaram em diferentes meios porosos, como pode ser observado na Figura 40a. O traço CP55HU(26) é estatisticamente diferente dos demais, segundo ANOVA e Teste Tukey, com $p\text{-valor} \leq 0,0051$, para todos gradientes hidráulicos testados.

Na Figura 40b pode ser observado que para todos CPs de concreto permeável ensaiados, do traço CP55HU(30), resultaram em menores coeficientes de permeabilidade para as maiores cargas hidráulicas. Desse modo, há um desvio de linearidade no escoamento, e as interpretações tradicionalmente realizadas na literatura, pela Lei de Darcy, não são suficientes para caracterizar as propriedades hidráulicas do concreto permeável.

Destaca-se que o comportamento hidráulico observado nesta primeira análise segue a mesma tendência do obtido por alguns pesquisadores (QIN *et al.*, 2015; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a), no entanto, estes buscam interpretar e modelar um comportamento hidráulico para o concreto permeável com base no regime darciano, mesmo que já verificado sua não linearidade, o que não tem sentido físico. Necessita-se, assim, de maiores investigações para a correta caracterização hidráulica do escoamento em concreto permeável.

Por fim, as análises derivativas deste estudo, retrataram que as propriedades do concreto permeável possuem influência das diferentes consistências da pasta, por menor que seja. O método Nguyen *et al.* (2014) adaptado se destaca pela boa estimativa, direcionando e corroborando para um projeto de dosagem das relações a/c. No entanto, a consistência resultante deste método, neste caso a relação a/c de 0,3, para o traço CP55HU, valendo-se para os demais resultados, não pode ser definida, necessariamente, como a consistência “ideal”. Tal afirmação se justifica no seguinte fato: nos traços em que houve um aumento/diminuição da relação a/c limite, obtiveram-se propriedades dentro de intervalos utilizáveis na produção do concreto permeável.

4.3 FASE III

Na Tabela 18 pode ser observado um resumo das principais propriedades do concreto permeável produzidos com diferentes relações P/Ag, com dados relativos à

porosidade total e efetiva, densidade no estado fresco e endurecido, resistência à compressão e a vazão para os três níveis hidráulicos ensaiados, com seus respectivos desvios padrão.

TABELA 18 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES RELAÇÕES P/AG

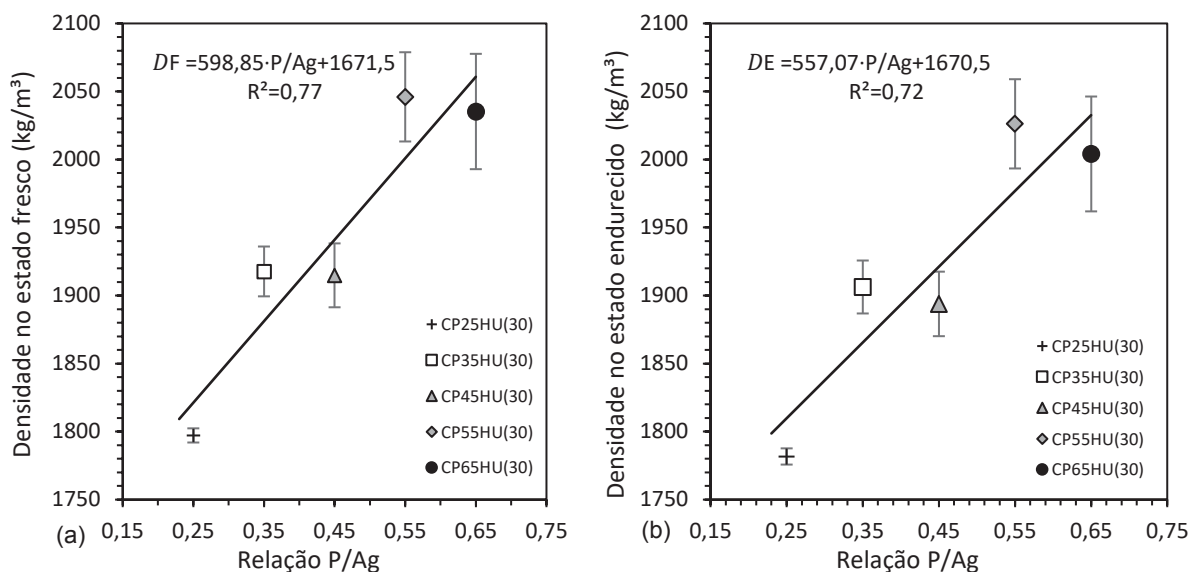
Traço	Densidade no est. Fresco (kg/m ³) (σ)	Densidade est. endurecido (kg/m ³) (σ)	Porosidade (%) (σ)		Resistência à compressão (MPa) (σ)	Propriedades hidráulicas: Vazão (l/s) (σ)		
			Total	Efetiva		ΔH: 20 cm	ΔH: 30 cm	ΔH: 40 cm
CP25HU(30)	1797,2 (5,20)	1781,71 (5,95)	35,23 (0,34)	28,66 (0,50)	2,17 (0,16)	*	*	*
CP35HU(30)	1917,17 (18,32)	1917,17 (18,32)	28,65 (0,86)	22,64 (0,92)	7,45 (1,02)	0,180 (0,013)	0,206 (0,016)	0,229 (0,016)
CP45HU(30)	1914,85 (23,48)	1914,85 (23,48)	28,44 (1,05)	24,58 (0,91)	7,77 (0,46)	0,161 (0,013)	0,182 (0,015)	0,202 (0,016)
CP55HU(30)	2046,04 (32,80)	2026,20 (32,41)	20,97 (1,62)	16,89 (1,20)	10,65 (1,07)	0,056 (0,016)	0,064 (0,018)	0,072 (0,021)
CP65HU(30)	2035,27 (42,38)	2004,08 (42,21)	20,93 (2,14)	17,93 (1,91)	13,01 (2,74)	0,069 (0,014)	0,078 (0,016)	0,087 (0,018)

*Não foram realizados

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 17 e 18, não há dúvida que os materiais constituintes influenciam nas propriedades finais do concreto permeável, e acrescenta-se que as correlações entre estas propriedades (densidade, porosidade e resistência) permanecem semelhantes.

Na Figura 41a pode ser observado a relação entre a densidade no estado fresco e a relação P/Ag. A densidade no estado fresco é um dado relevante e está diretamente relacionada com a intensidade de compactação necessária para produção do concreto permeável após seu lançamento, característica importante para o controle da porosidade de projeto. Já na Figura 41b pode ser observado a relação entre a densidade no estado endurecido e a relação P/Ag. Nota-se na Figura 41a e 41b que a regressão linear possui alta correlação entre as variáveis: relação P/Ag e densidade no estado fresco ($R^2=0,77$) e densidade no estado endurecido ($R^2=0,72$), respectivamente.

FIGURA 41 – RELAÇÃO P/Ag E DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (A) E DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO (B)

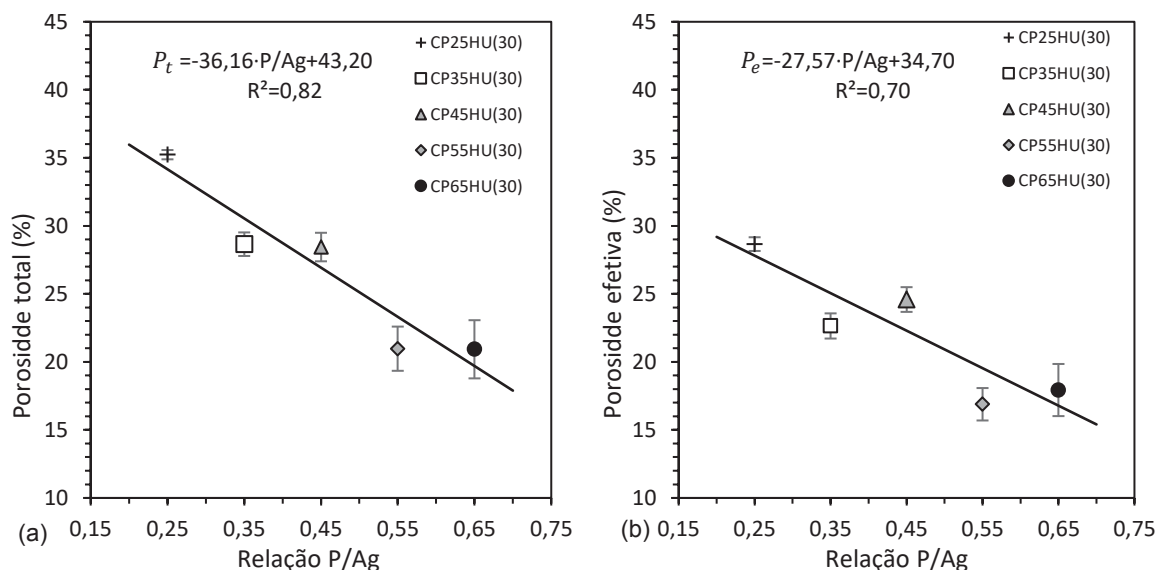


Para análise da densidade no estado fresco, as amostras entre os traços CP55HU(28) e CP55HU(30), CP55HU(32) e CP55HU(34) são estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,906$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 1,18 \times 10^{-7}$. Para análise da densidade no estado endurecido, as amostras entre os traços CP55HU(28) e CP55HU(30), CP55HU(32) e CP55HU(34) permaneceram estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,395$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 8,26 \times 10^{-8}$.

De modo geral, nota-se a alta sensibilidade do concreto permeável a pequenas variações na relação P/Ag, promovendo uma amplitude na densidade de até 250 kg/m³ para ambos os casos. O alto desvio padrão das amostras do mesmo traço reforça que cada CP de concreto permeável é resultante de um processo aleatório e único, embora passível de classificação dentro de um intervalo de comportamento, a porosidade do meio influencia diretamente em seu comportamento final.

Na Figura 42 pode ser observado a influência da relação P/Ag na porosidade do concreto permeável. Nota-se na Figura 42a e 42b que a regressão linear possui alta correlação entre as variáveis: relação P/Ag e porosidade total ($R^2=0,82$), e porosidade efetiva ($R^2=0,70$), respectivamente.

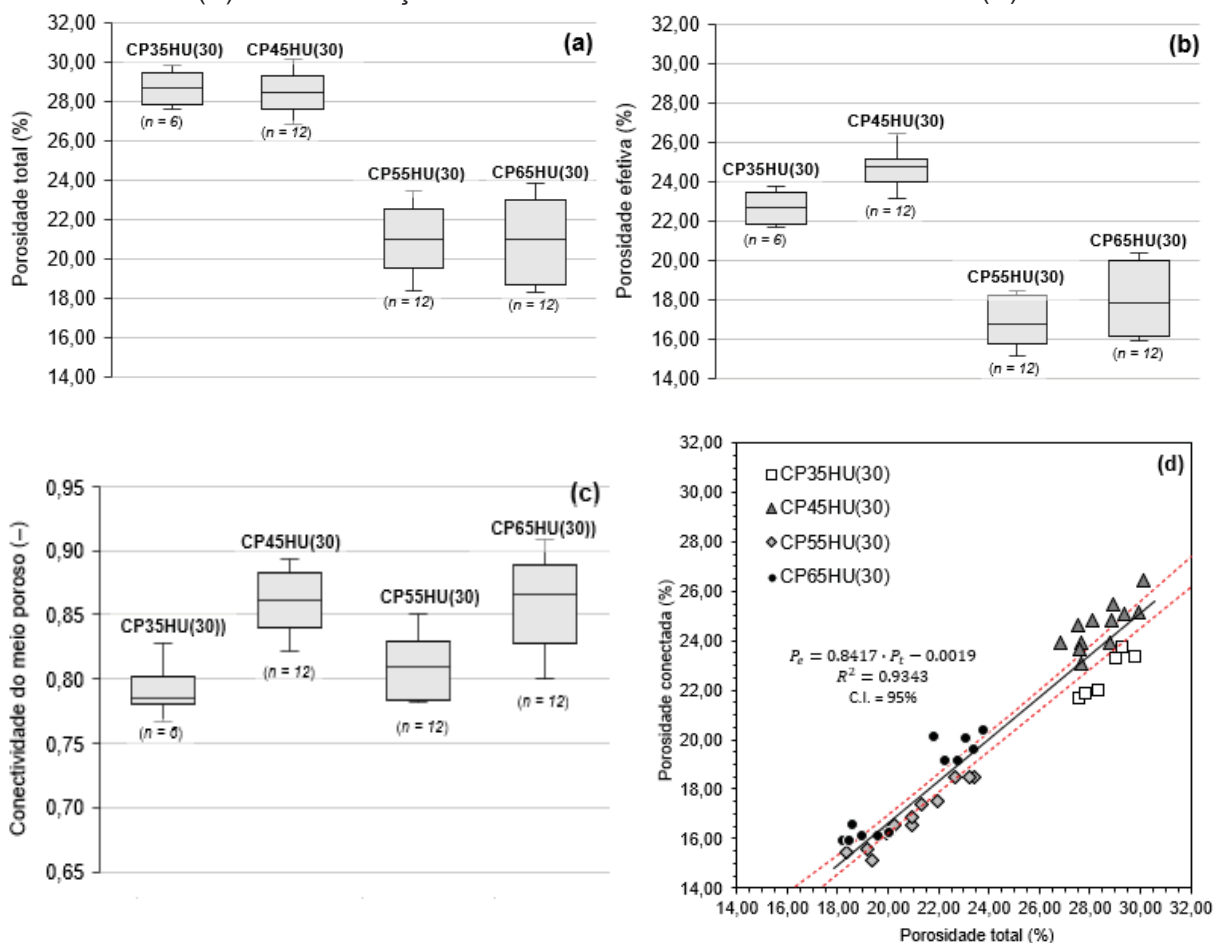
FIGURA 42 – RELAÇÃO P/AG E POROSIDADE TOTAL (A) E POROSIDADE EFETIVA (B)



Para análise da porosidade total, as amostras entre os traços CP35HU(30) e CP45HU(30), CP55HU(32) e CP55HU(34) são estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,99$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 1,52 \times 10^{-8}$. Para análise da porosidade efetiva, as amostras entre os traços CP55HU(32) e CP55HU(34) são estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,28$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 0,031$. Semelhante as correlações anteriores, nota-se a alta sensibilidade do concreto permeável a pequenas variações no volume de pasta, promovendo uma considerável amplitude nos valores de porosidade total e efetiva, com diferenças de até 15% para ambos os casos.

Na Figura 43 pode ser observado dados relativos as características físicas do meio poroso. Nas Figuras 43a, 43b e 43c podem ser observado os resultados de porosidade total (P_t), porosidade efetiva (P_e) e a conectividade dos poros do concreto permeável (P_e/P_t), respectivamente, assim como seus desvios padrão, sendo apresentados através de *boxplot*. Por fim, na Figura 43d pode ser observado a correlação entre P_t e P_e ($R^2=0,93$).

FIGURA 43 – DADOS DE POROSIDADE TOTAL (A), EFETIVA (B), CONECTIVIDADE DOS POROS (C) E CORRELAÇÃO ENTRE POROSIDADE TOTAL E EFETIVA (D)



Como esperado, os traços CP55HU(30) e CP65HU(30), com maiores relações P/Ag , apresentaram menores porosidades - ambas P_t e P_e . No entanto, eles também exibiram maior variabilidade entre as amostras do que nas misturas CP35HU(30) e CP45HU(30). A hipótese é de que o maior teor de pasta na mistura, resulta em diferentes configurações geométricas possíveis que ela pode assumir; geometrias diferentes significam variabilidade na porosidade.

Como pode ser observado na Figura 43d, a relação linear entre P_e e P_t , é altamente correlacionada. ANOVA e teste de Tukey foram realizados para avaliar as diferenças observadas entre P_t e P_e . O nível de significância considerado foi de 0,05. Para a mesma relação P/Ag , as P_e foram menores do que o P_t (valor de $p \leq 0,0015$ em todas as comparações ANOVA). A maior queda porosidade efetiva era esperada nas misturas com maiores relações P/Ag (CP55HU(30) e CP65HU(30)), pois, com maior teor de pasta, a perda de conectividade entre os poros é mais provável de ocorrer - mas não o contrário, como verificado por Zhong e Wille (2016). Isso pode ser

devido à imprecisão experimental, ou a inadequação metodológica, o que atesta a dificuldade de padronização de um teste para avaliação da P_e . Porém a média da diferença entre as porosidades, total e efetiva, encontra-se em intervalos dentro do obtido na literatura (LIAN *et al.*, 2011; ZHONG; WILLE, 2016).

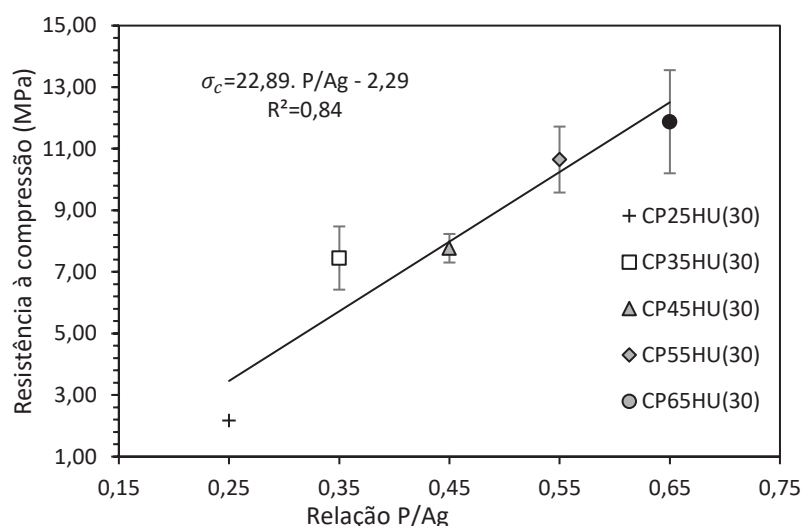
Os autores (COSIC *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2019) analisaram a correlação entre P_t e P_e utilizando modelos baseados em *XRCT* (*X-Ray Computed Tomography*). No entanto, na literatura não há discussões entre estas porosidades obtidas de modo experimental. Zhang *et al.* (2018) e Yu *et al.* (2019) obtiveram uma conectividade (P_e/P_t) superior a 0,90 para as porosidades totais de aproximadamente 20%. No entanto, para essa mesma porosidade, Cosic *et al.* (2015) obtiveram conectividades menores de 0,50 e 0,70 para os dois CPs de diferentes traços. Em relação a abordagem experimental desta tese, a conectividade média obtida para semelhantes porosidades totais ($\approx 20\%$) foi de 0,81 ($\sigma=0,02$) para o traço CP55HU(30) e de 0,86 ($\sigma =0,04$) para o traço CP65HU(30). Os dados de conectividade e porosidade total são altamente correlacionados para a mesma relação P/Ag , como verificado pela ANOVA e teste de Tukey, atendendo o nível de significância de 0,05.

Desse modo, não há dúvidas do superdimensionamento dos poros isolados devido as inconsistências metodológicas ainda presente na metodologia adotada, embora ainda recomendada pela ACI 522R-10 (2010), e utilizada por grande parte dos pesquisadores (DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010; KUO; LIU; SU, 2013; ONG; JAGADEESH; SU, 2020 e outros), o que contribui para erros experimentais. Dentre as possíveis explicações para a alta porosidade isolada, é devido à dificuldade na determinação dos poros na superfície lateral do CP, que podem ficar confinados quando os poros de uma única abertura ficam em contato com a célula de confinamento, ou seja, em contato direto no papel filme/molde cilíndrico, não possibilitando o escoamento do fluido. Ong, Jagadeesh e Su (2020) relatam que a maioria dos estudos na literatura não identifica características da rede de poros (como porosidade efetiva, diâmetro dos poros e tortuosidade) e que podem afetar a permeabilidade experimental. Ainda que técnicas de tomografia computadorizadas em 3D sejam empregadas para definição da porosidade efetiva, alguns autores como Cosic *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2018), Chandrappa e Biligiri (2018) e Ong, Jagadeesh e Su, (2020) observam erros percentuais com relação as porosidades experimentais.

Ong, Jagadeesh e Su, (2020), por exemplo, constatou que erros percentuais entre as porosidades experimentais e computadorizadas são de até 18%.

O desempenho mecânico, caracterizado pela resistência à compressão, está intimamente relacionado com a relação P/Ag, com alta correlação entre os resultados ($R^2=0,84$). As maiores relações P/Ag contribuíram para um aumento na resistência à compressão, influenciado pela maior espessura de pasta na camada de ligação entre os agregados, comportamento também observado por Torres, Hu e Ramos (2015). Além disso, as maiores relações P/Ag garantiram CPs com menores porosidades, o que efetivamente influencia na sua capacidade resistente. Esta relação pode ser observada na Figura 44.

FIGURA 44 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E RELAÇÃO P/AG

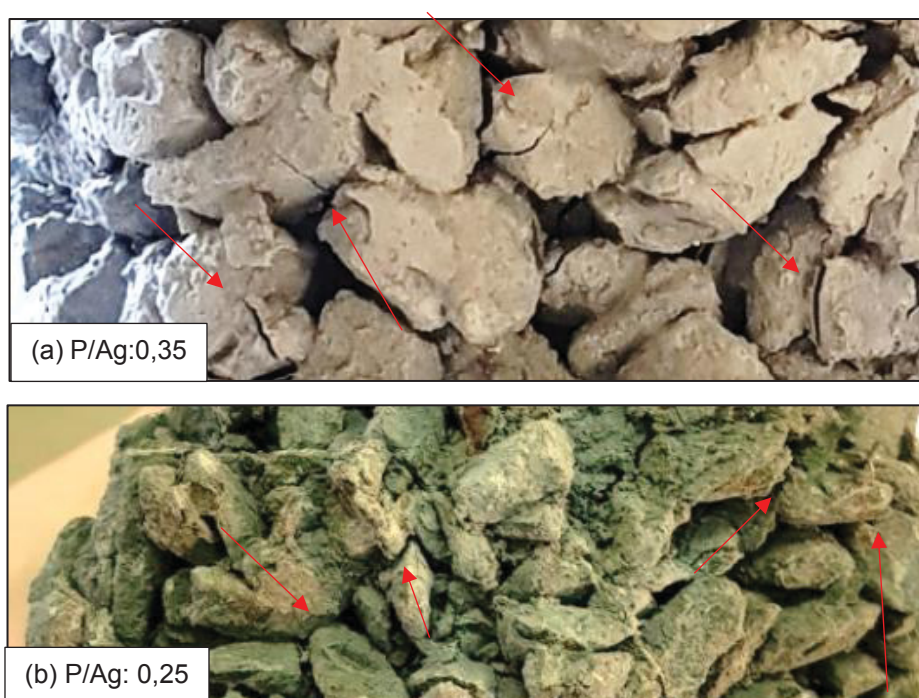


A resistência à compressão entre os traços CP35HU(30) e CP45HU(30), CP55HU(30) e CP65HU(30) foram estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com p-valor $\geq 0,42$. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com p-valor $\leq 0,0002$. De modo geral, nota-se que à medida que o volume de pasta aumentou, a sua resistência também aumentou, seguindo semelhante comportamento em relação a porosidade total.

As observações laboratoriais do ensaio de resistência à compressão renderam ricas interpretações sobre o comportamento do concreto permeável. Nota-se que a atenuação da resistência à compressão é mais evidente quando a ruptura do concreto permeável passa a ocorrer na interface pasta/agregado, onde há uma redução da espessura da camada de ligação à medida a porosidade aumenta.

Na Figura 45 podem ser observados dois comportamentos particulares da ruptura dos CPs de concreto permeável. Nos traços com relação $P/Ag \geq 0,35$, onde a porosidade é menor que 30%, Figura 45a, a aplicação de carga promove, predominantemente, danos isolados e fissuras nos próprios agregados graúdos. No entanto, observou-se que para o traço com relação P/Ag de 0,25, onde as porosidades foram superiores a 30%, Figura 45b, a fratura ocorreu predominantemente na camada de ligação entre os agregados, devido a menor espessura de pasta.

FIGURA 45 – FISSURAS NO CONCRETO PERMEÁVEL: RELAÇÃO P/Ag DE 0,35 (A) E 0,25(B)



O mesmo comportamento foi observado por Yahia e Kabagire (2014) na ruptura do concreto permeável, onde os CPs confeccionados com uma relação P/Ag de 0,30 a falha ocorreu na interface entre agregado e a camada de pasta, e quando o concreto é confeccionado com maiores relações P/Ag , acima de 0,30, a falha ocorreu sempre no agregado, o que significa que a pasta de cimento, na camada de ligação, transmite o carregamento aplicado de modo mais efetivo para os agregados, influenciando na resistência final.

Outro aspecto verificado durante o carregamento de compressão axial foi que no instante em que o conjunto granular sofria uma ruptura, o mesmo já se rearranjava e continuava contribuindo para maiores valores de resistência, com diversas falhas

porosos, como pode ser observado na Figura 46a. O traço CP55HU(26) e CP65HU(26) foram estatisticamente semelhantes segundo ANOVA e Teste Tukey, com $p\text{-valor} \geq 0,204$, para todos gradientes hidráulicos testados. Por outro lado, os demais traços são estatisticamente diferentes com $p\text{-valor} \leq 0,043$.

Seguindo o mesmo comportamento da análise realizada na Fase II, pode ser observado na Figura 46b que para cada CP de concreto permeável ensaiado, resultaram menores coeficientes de permeabilidade para as maiores cargas hidráulicas, o que não tem sentido físico.

De modo geral, a campanha experimental buscou extrapolar o limite do que vem sendo desenvolvido e, a partir do momento em que foram ensaiadas diferentes cargas hidráulicas para cada CP, notou-se que continuar utilizando a linearidade proposta pela Lei de Darcy seria como adotar arbitrariamente um regime de escoamento não correspondente ao real fenômeno, o que levaria a coeficientes de permeabilidades subestimado ou superestimado. **Com isso, surge um problema de pesquisa, e sua solução depende de interpretações fundamentadas na mecânica dos fluidos para meios porosos**, cujo desenvolvimento é realizado no Capítulo 5.

4.4 FASE IV¹⁰

As investigações conduzidas através do Método do Ultrassom buscaram uma nova maneira de caracterizar as propriedades do concreto permeável, com a possibilidade de analisar o comportamento da propagação das ondas ultrassônicas em meios porosos, e os efeitos de sua atenuação. A análise foi conduzida nos CPs produzidos para Fase III, buscando a menor variabilidade em seus materiais constituintes, utilizando-se uma fração granulométrica uniforme, compactado com haste e com variações apenas na relação P/Ag (0,25 a 0,65). Os resultados foram obtidos com 14 dias de cura e levou-se em consideração o controle de umidade. Na Tabela 19 podem ser observados os resultados médios da VPU com seu respectivo desvio padrão.

¹⁰ Parte destes resultados foram publicados: MARTINS FILHO, S.T.; BOSQUESI, E.M.; FABRO, J.R.; PIERALISI, R. *Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing*. **IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL**, v.13, p. 483 – 500, 2020.

TABELA 19 – VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

Traços	Pasta/ Agregado	Velocidade ultrassônica (m/s) (σ)
CP25HU(30)	0,25	2354,38 (102,27)
CP35HU(30)	0,35	3042,64 (54,51)
CP45HU(30)	0,45	3719,79 (48,91)
CP55HU(30)	0,55	4063,50 (73,28)
CP65HU(30)	0,65	4163,00 (97,70)

A partir de uma análise geral dos resultados, pode ser conclusivo que a VPU aumentou para as maiores relações P/Ag, como observado na Figura 47. Através do critério AIC para inclusão/exclusão, utilizado pelo Método de *Stepwise*, as variáveis significativas foram selecionadas e submetidas a uma análise de resíduos, e verificou-se uma alta correlação ($R^2=0,95$) entre a relação P/Ag na determinação da VPU, como retratado na Tabela 20.

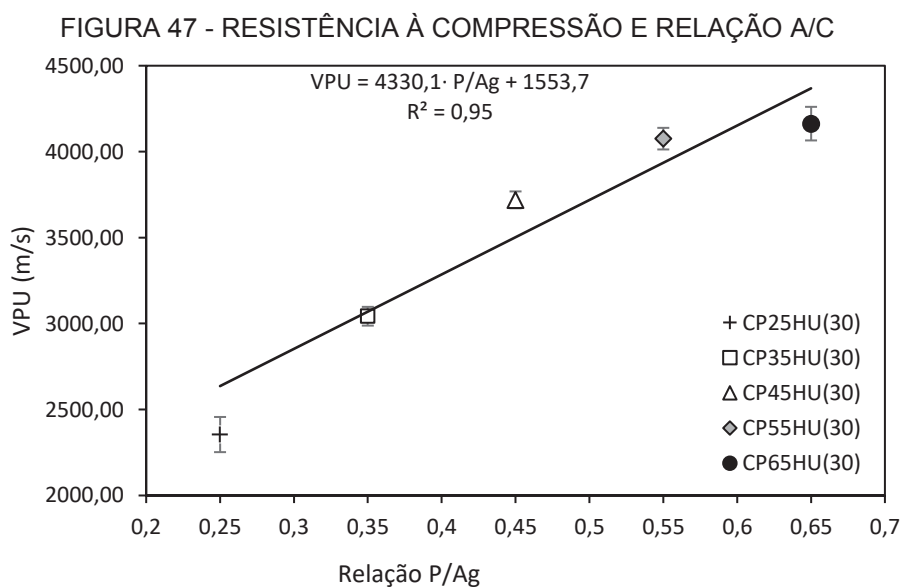


TABELA 20 - MÉTODO STEPWISE-ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO VPU E P/AG

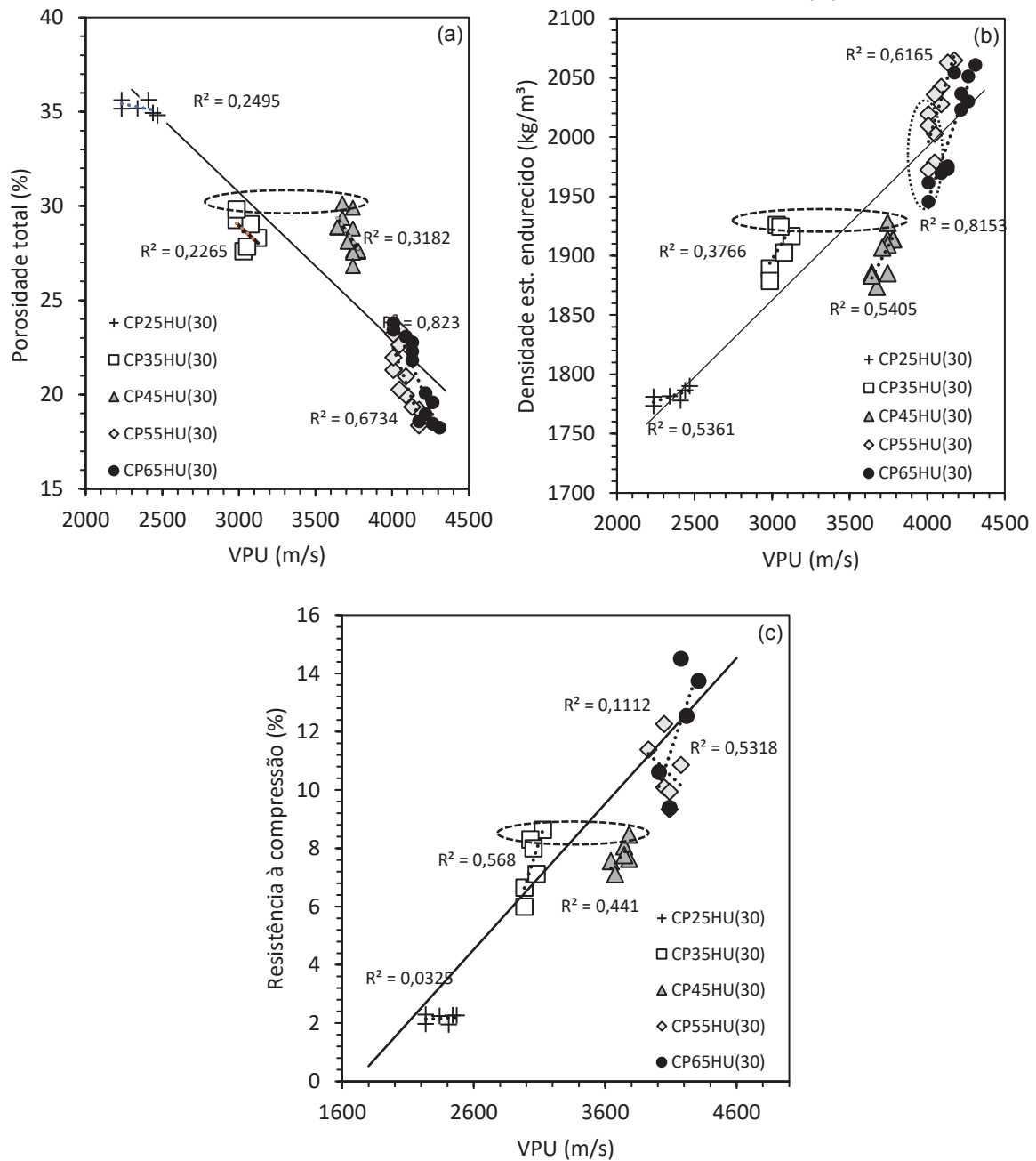
Equação	Parâmetros	Estimado	DP	p-valor	R ²	Equação
$VPU = \beta_0 + \beta_1 \cdot P/Ag$	β_0	1537,55	114,483	<0,01	0,95	46
	β_1	4356,37	227,156	<0,01		

De fato, embora estas variáveis apresentem alta correlação, as conclusões são derivativas apenas para estes dados, onde sua aplicabilidade não é genérica para todas as diferentes relações P/Ag a fim de prever a VPU. Além disso, decidiu-se que as correlações extraídas para estimar as propriedades do concreto permeável devem considerar apenas a VPU como parte do modelo preditivo para que não haja multicolinearidade na obtenção dos resultados de cada CP elaborado.

Nota-se nos resultados médios de VPU um alto desvio padrão, reafirmando a inconsistência de caracterizar o concreto permeável pela generalidade do traço, sem levar em consideração a singularidade de cada CP, com suas respectivas propriedades de densidade/porosidade que efetivamente influenciam na propagação da onda ultrassônica.

Na Figura 48a pode ser observado a relação entre porosidade total e VPU, e uma correlação pontual para cada traço. De modo geral, pode-se afirmar que a VPU aumenta à medida que a porosidade diminui, comportamento esperado uma vez que os vazios provocam atenuação onda ultrassônica, ou seja, quanto menor a porosidade, aumenta a possibilidade da onda sonora encontrar caminhos preferenciais, mais curtos, para sua propagação. Consequentemente, essas considerações também são válidas para as correlações com a densidade no estado endurecido e para resistência à compressão, como podem ser observados na Figuras 48b e 48c.

FIGURA 48 - RELAÇÃO ENTRE VPU COM POROSIDADE TOTAL (A) E DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO (B) RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (C)



Na Tabela 21 pode ser observado, através do método de *stepwise*, que a variável VPU teve um nível de 5% de significância para modelar as propriedades do concreto permeável: P_t , D_e e σ_c . Nota-se a concordância entre os resultados experimentais e estimados com uma correlação (R^2) acima de 0,90 para as três propriedades.

TABELA 21 - MÉTODO STEPWISE-ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO A/C E P/AG

Equação	Parâmetros	Estimado	DP	p-valor	R ²	Equação
$P_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot VPU$	β_0	54,028	1,971	<0,01	0,90	47
	β_1	-0,008	0,001	<0,01		
$D_e = \beta_0 + \beta_1 \cdot VPU$	β_0	1497,612	33,420	<0,01	0,90	48
	β_1	0,122	0,009	<0,01		
$\sigma_c = \beta_0 + \beta_1 \cdot VPU$	β_0	-8,475	1,339	<0,01	0,92	49
	β_1	0,005	0,001	<0,01		

Na Figura 48a pode ser observado que o aumento da porosidade total, de 18 e 35%, correspondeu a uma variação da VPU entre 4310,34 a 2234,64 m/s, respectivamente. Destaca-se o mesmo comportamento obtido na pesquisa desenvolvida por Ridengaoqier e Hatanaka (2021).

Os resultados obtidos retrataram comportamentos distintos entre os diferentes traços, nota-se os coeficientes angulares da linha de tendência de cada relação P/Ag. Para porosidades superiores a 30%, há uma menor correlação dos traços e a VPU não é tão determinante na definição de suas propriedades. Consequentemente, essa tendência se estende para densidade no estado endurecido e resistência à compressão.

Além da variabilidade dos resultados em decorrência da atenuação da onda ultrassônica, observa-se na Figura 48a e 48b que CPs com semelhantes porosidades e densidades resultaram em diferentes VPUs. Dentre os diversos fatores que influenciam nesta caracterização, não há dúvidas de que os materiais constituintes atuam diretamente na velocidade de transmissão da onda (COSIC *et al.* 2015; RIDENGAOQIER; HATANAKA, 2021). Na Figura 48b, também pode ser observado que CPs de diferentes densidades, entre 1950 e 2050 kg/m³, obtiveram semelhantes VPUs, de aproximadamente 4000 m/s.

Outra análise que merece maiores considerações está relacionada ao volume de pasta no traço, onde a maior espessura de pasta da camada de ligação pode promover caminhos preferenciais mais curtos, que auxiliam na propagação da onda ultrassônica quando comparados aos elementos com maiores volume de agregados, por exemplo. Além disso, não restam dúvidas que as maiores relações P/Ag promovem um melhor acabamento superficial para o acoplamento dos transdutores, o que também influencia no ensaio, assim como verificou Chandrappa e Biligiri (2016c).

A partir de determinada densidade, onde a porosidade torna-se menos evidente, mais canais sólidos de transmissão da onda são possíveis, diminuindo o percurso até determinado momento em que a onda ultrassônica percorre uma reta, comparável a um canal de tortuosidade igual a 1, onde os valores de VPU passam a se aproximar dos intervalos de leituras do concreto convencional. Neste caso, em que a porosidade passa a não ser mais significativa, outras variáveis relacionadas aos materiais constituintes passam a influenciar na determinação da VPU.

As correlações apresentadas sugerem o potencial de aplicação do método do ultrassom, no entanto as limitações são evidentes quanto aos fatores relacionados as altas (>30%) e baixas (<15%) porosidades, quando ocorrem atenuação da onda ultrassônica, e nas situações em que a porosidade é menos expressiva e a sua influência já não é mais significativa nas leituras de VPU, respectivamente. As conclusões derivativas deste estudo também foram constadas por Martins Filho *et al.* (2020), acerca da variabilidade do método do ultrassom.

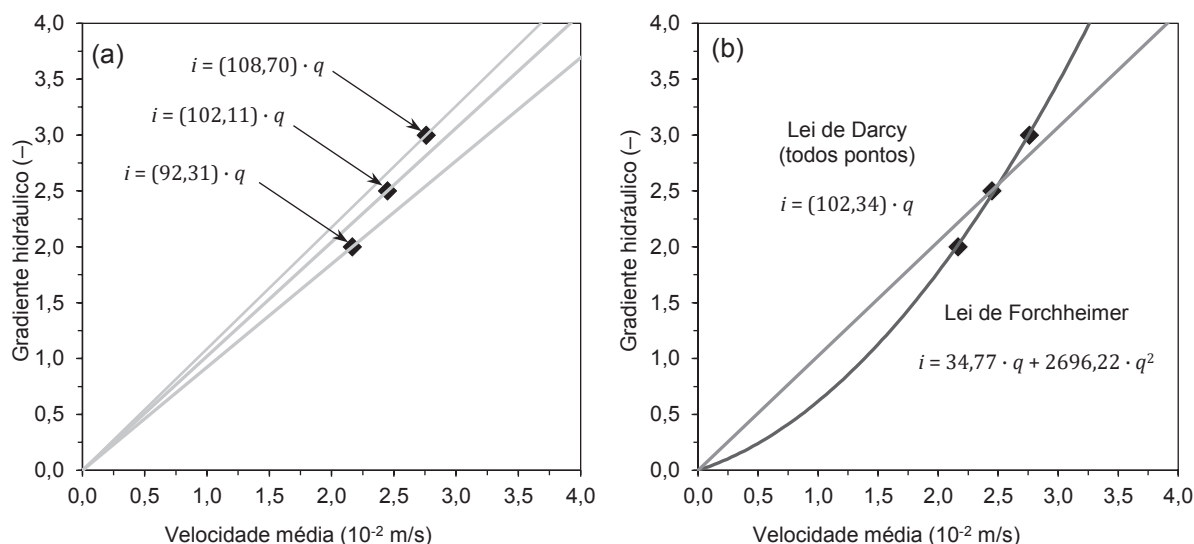
5 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL¹¹

5.1 CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO EM MEIO POROSOS

Como observado nos resultados da Fase II e III do programa experimental (Subitem 4.2 e 4.3), a Lei de Darcy ($q = K \cdot i$, Equação 15) não foi suficiente para caracterizar as propriedades hidráulicas do escoamento no concreto permeável. Desse modo, é necessária uma outra abordagem para determinar o seu real comportamento, com foco em escoamentos não lineares. Para isso, utilizou-se da equação de Forchheimer ($i = a \cdot q + b \cdot q^2$, Equação 16), que adiciona um termo quadrático à Lei de Darcy. Interpretações destes modelos foram realizadas no subitem 2.6.2.

A fim de ilustrar a conjectura adotada entre essas duas equações, um estudo comparativo foi realizado de modo a exemplificar os dados hidráulicos do traço CP35HU(30). Assim, pode ser observado na Figura 49 a relação entre velocidade, q (L/T), e o gradiente hidráulico, i (L/L), com ajustes de acordo com a Lei de Darcy, Figura 49a, e através da equação de Forchheimer, Figura 49b.

FIGURA 49 - AJUSTES DE ACORDO COM A LEI DE DARCY (A) E A EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER (B) PARA ESCOAMENTO EM CONCRETO PERMEÁVEL



¹¹ Parte deste capítulo foi incluído no artigo: **FRAMEWORK TO CHARACTERIZE NONLINEAR FLOW THROUGH PERVIOUS CONCRETE**, em processo de revisão avançada na revista **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH (CCR)**.

Ao aplicar a Lei de Darcy foram obtidos três valores distintos do coeficiente angular da respectiva equação, a ($1/K$), os quais conduzem a três valores diferentes de K e, subsequentemente, de \sqrt{k} . Esta abordagem não permite a caracterização do comportamento hidráulico deste CP de concreto permeável, pois os valores de \sqrt{k} obtidos não são aplicáveis em casos que extrapolam as condições de ensaio. Além disso, nenhum dos valores de K obtidos é válido para a análise de uma situação de fluxo diferente. Isso demonstra que o uso da Lei de Darcy é inadequado para avaliar os resultados experimentais de concreto permeável e pode levar a problemas de projeto.

A Lei de Darcy até poderia ser adequada considerando todos os três pontos simultaneamente, no entanto isso está longe do ideal, uma vez que a tendência obtida não reflete o real comportamento da série de dados, enfrentando os mesmos problemas expostos anteriormente. Em contraste, como pode ser observado na Figura 49b, os coeficientes a e b da equação de Forchheimer, permitiram uma determinação única dos valores de $\sqrt{k} = \sqrt{\mu/(\rho \cdot g \cdot a)}$ e $d = g \cdot k \cdot b$. Esses parâmetros são suficientes para caracterizar o escoamento através do concreto permeável não apenas nas condições testadas, mas para qualquer outra situação de escoamento. Os coeficientes a e b da equação de Forchheimer, para cada CP de concreto permeável, foram obtidos através do uso do método dos mínimos quadrados em função dos resultados experimentais.

Desse modo, utilizar a equação de Forchheimer seria dizer que é a curva composta/ajustada por infinitas curvas darcianas, uma para cada vazão/velocidade, com um correspondente coeficiente de permeabilidade equivalente (K_{eq}), como pode ser exemplificado pelo desenvolvimento das Equações 50, 51 e 52, correspondente a Forchheimer escrita nos moldes da Lei de Darcy, com sua “constante angular” ajustada a $1/K_{eq}$, retratando os modelos relacionados no gráfico da Figura 49b.

$$i = a \cdot q + b \cdot q^2 \quad (50)$$

$$i = (a + b \cdot q) \cdot q \quad (51)$$

$$i = \frac{1}{K_{eq}} \cdot q \quad (52)$$

A partir disso, o coeficiente de permeabilidade equivalente de Darcy, K_{eq} , obtido por Forchheimer, pode ser reescrito pela Equação 53, atribuindo sentido físico ao comportamento supracitado.

$$K_{eq} = \frac{1}{(a + b \cdot q)} \quad (53)$$

Resumidamente, usar a Lei de Darcy é fazer ajustes com um único ponto, e os resultados só servem para as mesmas condições de vazão/gradiente. Usar Forchheimer permite avaliar o comportamento do meio poroso para todas as condições de vazão/gradiente.

A utilização da Lei de Darcy seria possível de aproximação para baixas velocidades, quando o fluxo é laminar, onde o coeficiente angular da equação linear de Darcy, coincide com a tangente da parábola da equação de Forchheimer. Matematicamente, isto quer dizer que a Lei de Darcy, $i = a \cdot q$, seria possível quando a correlação $a \cdot q \gg b \cdot q^2$ se torna evidente, e a constante quadrática de Forchheimer, b , deixa de ser significativa no escoamento. A definição do regime de escoamento através da análise gráfica seria de pouca validade prática para o meio poroso, como já foi notado na pesquisa de Zhang *et al.* (2018). Para definição do regime de escoamento são necessárias considerações bem fundamentadas sobre as características físicas do meio poroso/escoamento do fluido, através dos parâmetros hidráulicos de Reynolds, Re , e do fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, incluindo influências da temperatura, viscosidade dinâmica e cinemática do fluido.

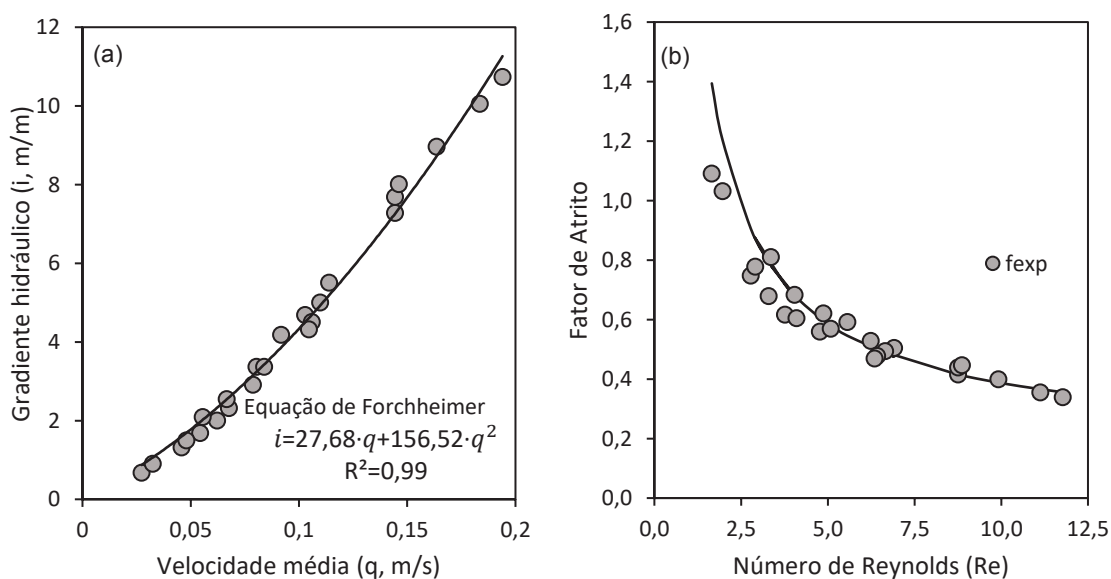
Assim, a partir das definições propostas por Lofrano *et al.* (2020), busca-se determinar o regime de escoamento no concreto permeável. Estes limites são definidos e classificados nos seguintes intervalos: Regime linear Darciano, $2 \leq Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} \leq 2,4$; Regime não linear de Transição, $2,4 < Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} < 22$; e de Regime não linear de turbulência, $Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} \geq 22$.

5.2 ANÁLISE DOS DADOS DE QIN *et al.* (2015)

Inicialmente, a caracterização do escoamento no meio poroso foi realizada a partir de dados hidráulicos obtidos na literatura. Desse modo, utilizou-se a pesquisa desenvolvida por Qin *et al.* (2015), que buscaram caracterizar o escoamento de quatro traços de concreto permeável, - aqui denominados de CP1(QIN), CP2(QIN), CP3(QIN), CP4(QIN), com porosidades de 31,59%, 28,19%, 26,59% e 25,64%, respectivamente – em permeâmetro de carga constante. Os dados obtidos (q e i) foram resultantes de uma campanha experimental ampla, com diferentes cargas hidráulicas, correspondentes as alturas entre 50 mm até 1500 mm.

Neste item foram apresentados os dados hidráulicos do escoamento para um traço específico, CP1(QIN), a fim de exemplificar a abordagem utilizada. Obtidos os dados de velocidade média do fluido, para seu respectivo gradiente hidráulico, obteve-se o comportamento não linear ilustrado pela Figura 50a, a partir desse comportamento gráfico, foram obtidas as constantes quadráticas da equação de Forchheimer. Posteriormente foram obtidas as características do escoamento através do número de Reynolds e do fator de atrito, como pode ser observado na Figura 50b.

FIGURA 50 - DADOS HIDRÁULICOS DO CONCRETO PERMEÁVEL DO TRAÇO CP1(QIN): (A) GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE MÉDIA (B) FATOR DE ATRITO E NÚMERO DE REYNOLDS



A obtenção dos dados supracitados seguiu a seguinte abordagem: A partir do comportamento hidráulico não linear descrito pela equação de Forchheimer, com

correlação (R^2) de 0,99, foram obtidas as constantes quadráticas $a = 27,68$ e $b = 156,52$, permitindo, assim, calcular os parâmetros hidráulicos que caracterizam o meio poroso, d e \sqrt{k} . Estes parâmetros são obtidos a partir das considerações de Ahmed e Sunada (1969), que determinaram as respectivas relações para os coeficientes da equação: $a = \left(\frac{\mu}{\rho \cdot g \cdot k}\right)$ e $b = \left(\frac{1}{g \cdot c \cdot d}\right)^{12}$. Resumidamente, o parâmetro d pode ser obtido pelo equacionamento: $d = g \cdot k \cdot b$. Posteriormente, determina-se o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, experimental e teórico, para cada carga hidráulica ensaiada, como descritos nas Equações 54, 55 e 56, respectivamente, sendo esta última equação extraída da estrutura algébrica de Darcy-Weisbach a partir da equação de Forchheimer. Estas deduções foram apresentadas detalhadamente no subitem 2.6.2, e reescritas abaixo.

$$Re_{\sqrt{k}} = \frac{\rho \cdot q \cdot \sqrt{k}}{\mu} \quad (54)$$

$$f_{trc} = 2 \cdot \left(\frac{1}{Re_{\sqrt{k}}} + \frac{d}{\sqrt{k}} \right) \quad (55)$$

$$i = f_{exp} \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{q^2}{2g} \quad (56)$$

No Apêndice A podem ser observados os dados do escoamento para os demais traços CP2(QIN), CP3(QIN), CP4(QIN) obtidos por Qin *et al.* (2015), com a mesma análise. A Tabela 22 retrata os parâmetros hidráulicos (d , k e d/\sqrt{k}) que caracterizam o meio poroso e seu escoamento para os quatro traços de concreto permeável.

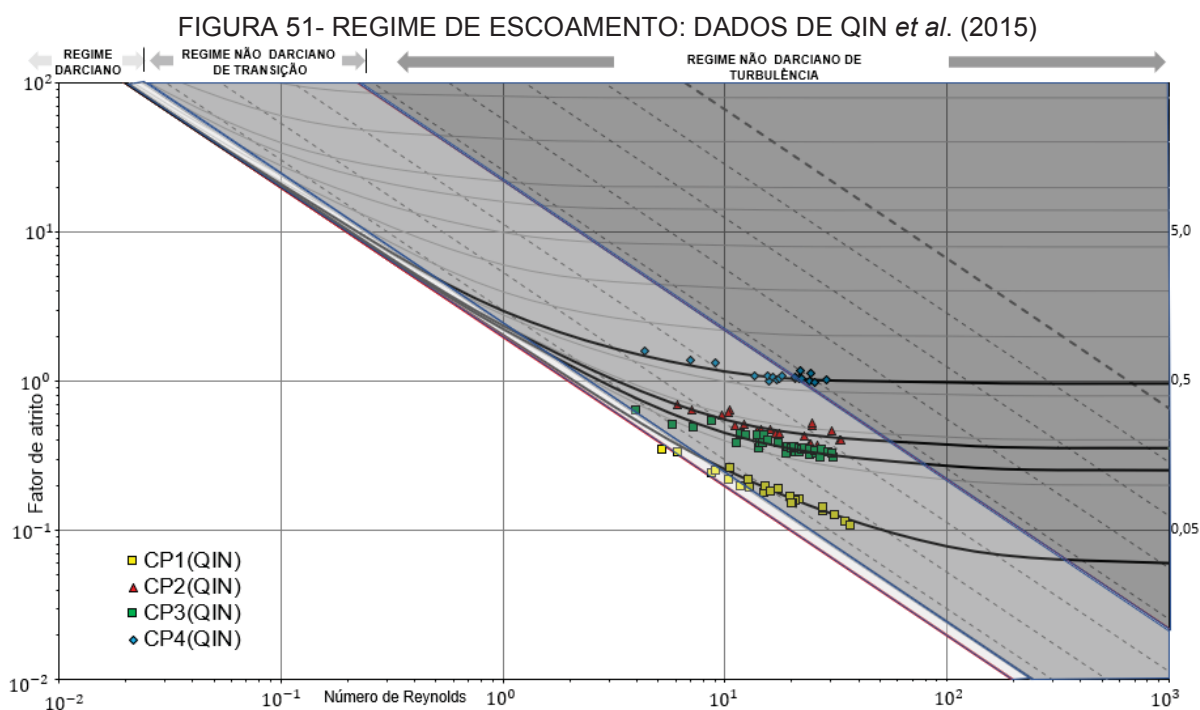
TABELA 22 - DADOS HIDRÁULICOS: TRAÇO QIN *et al.* 2015

Traço	P_t (%)	a (s/m)	b ($10^2 \text{ s}^2/\text{m}^2$)	\sqrt{k} (10^{-5} m)	d (10^{-5} m)	d/\sqrt{k} (-)
CP1(QIN)	31,59	2,77	0,16	19,19	0,56	0,03
CP2(QIN)	28,19	1,65	0,72	24,84	4,39	0,17
CP3(QIN)	26,59	2,13	0,58	21,90	2,75	0,13
CP4(QIN)	25,64	1,11	1,60	30,32	14,4	0,47

¹² $k = c \cdot d^2$; $\rho = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$; $g = 9,81 \text{ m/s}$; $\mu = 1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

A metodologia adotada permite padronizar a caracterização do escoamento (d/\sqrt{k}) no concreto permeável, sendo único e particular de cada meio poroso em decorrência da sua heterogeneidade. Destaca-se que não deve haver, nem na hipótese de que o escoamento não seja linear, mais de um coeficiente de permeabilidade para cada meio. É um princípio filosófico – se um determinado meio tem uma respectiva propriedade, e este meio não muda, logo, a propriedade não deve mudar – sob risco de não ser intrínseca a ele. Mais relevante que essa questão, foi buscar um critério que delimitasse o regime de escoamento e retratasse o real comportamento do fluido.

Assim, após a obtenção dos parâmetros hidráulicos, busca-se atribuir sentido físico ao escoamento através do número de Reynolds (Re) e do fator de atrito ($f\sqrt{k}$) para cada carga hidráulica ensaiada, sendo o regime de escoamento no meio poroso definido em função das características do fluido ao atravessar seus poros conectados. Na Figura 51 pode ser observado o Diagrama de Lofrano *et al.* (2020) com delimitações entre os diferentes regimes de escoamento, sendo o primeiro considerado darciano, e o segundo de transição ou de turbulência, com os dados de escoamento dos quatro traços produzidos por Qin *et al.* (2015). Nota-se que o parâmetro adimensional d/\sqrt{k} é preciso e se ajusta bem na caracterização do escoamento do concreto permeável.

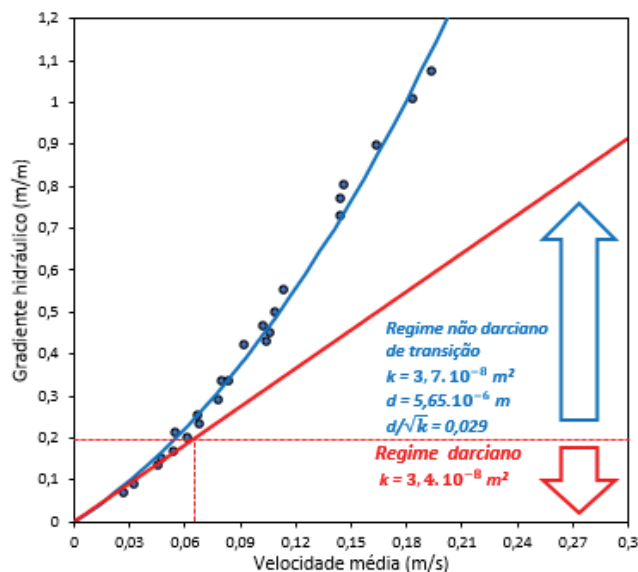


A partir dos limites estabelecidos, nota-se que, para os quatro traços, o escoamento do fluido pertence ao regime não linear de transição, predominantemente dentro da faixa $2,4 < Re_{\sqrt{k}} \cdot f_{\sqrt{k}} < 22$. Para o traço CP4(QIN), de menor porosidade dentre estes, atingiu, para as maiores cargas hidráulicas (altura de carga acima de 1,0 m), o regime turbulento. Assim, esta é mais uma demonstração da importância de se considerar a não linearidade do fluxo em aplicações de concretos permeáveis, ressaltando que a utilização da Lei de Darcy não deve ser utilizada nestas circunstâncias.

Como esperado, à medida que o valor do número de Reynolds aumenta, o fator de atrito diminui. Destaca-se que cada CP ensaiado mantém o mesmo comportamento hidráulico (d/\sqrt{k}) independente da carga hidráulica aplicada. Tal afirmação pode ser observado com a sobreposição dos pontos, retratando a confiabilidade do método para atribuir sentido físico ao escoamento, levando em consideração a heterogeneidade do meio poroso de cada CP. Além disso, definido os parâmetros hidráulicos de d/\sqrt{k} , o diagrama permite predizer o fator de atrito para qualquer vazão, auxiliando em projetos de drenagem, e evitando o super ou subdimensionamento.

Dentre os CPs analisados, houve outro comportamento particular em relação ao traço CP1(QIN) ($P_t = 31,59\%$), que teve escoamentos com características dentro dos regimes darciano e de transição. A fim de promover maior clareza dos resultados, pode ser observado na Figura 52 os dados da velocidade média, q , para cada gradiente hidráulico, i , permitindo as delimitações do regime de escoamento.

FIGURA 52 - GRADIENTE HIDRAULICO E VELOCIDADE MÉDIA: DELIMITAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO DO TRAÇO CP1(QIN)



Neste caso, nota-se a possibilidade de especificar o gradiente hidráulico para o qual o regime pode ser classificado como darciano, correspondente, neste caso, em 0,20 m/m. Este comportamento reforça a generalidade e robustez das equações derivativas de Forchheimer aqui utilizadas, onde em baixas velocidades, se reduz na Lei de Darcy, o qual o termo constante, α , passa a ter maior influência na característica do escoamento. Destaca-se que dentre os demais traços estudados nesta tese, este apresentou-se com maior porosidade total, influenciando em um menor fator de resistência do fluido, ou seja, com maior escoamento, como pode ser observado pelo parâmetro d/\sqrt{k} obtido e retratado no diagrama da Figura 51.

A aleatoriedade envolvida no preenchimento dos vazios dos concretos permeáveis, à medida que o teor de pasta aumenta, incorre em uma variabilidade entre caminhos de fluxo disponíveis e não disponíveis. Essa variabilidade se traduz, de alguma forma, nos valores dos escoamentos relatados, únicos para cada CP, independentemente da carga hidráulica aplicada.

Assim, a partir da análise com dados da literatura, verificou-se a potencialidade desta abordagem metodológica na definição do regime de escoamento para concreto permeável. **Destaca-se sua relevância pelo ineditismo na caracterização do concreto permeável.** O estado da arte carece de definições bem fundamentadas na obtenção do número de Reynolds, onde normalmente os parâmetros físicos utilizados para caracterizar o meio poroso do concreto permeável

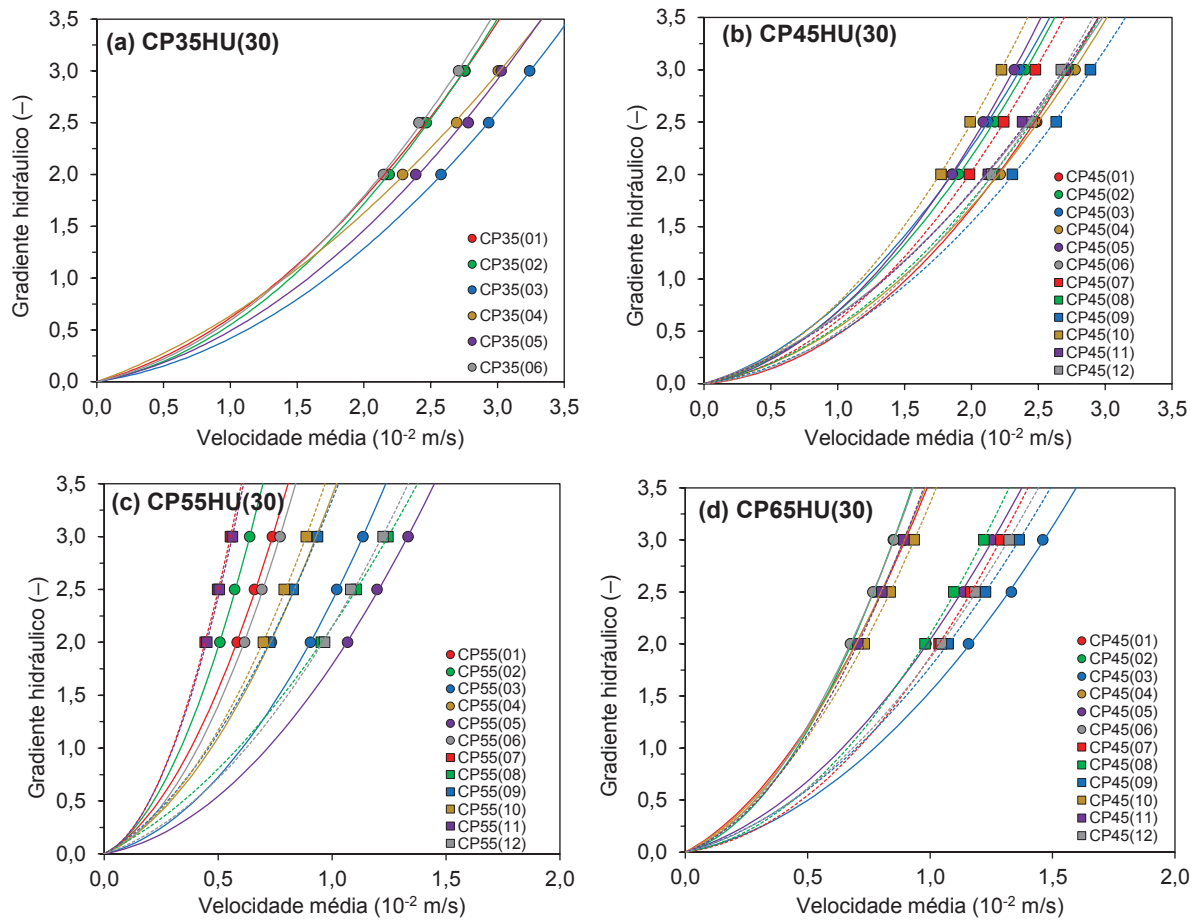
costumam ser uma aproximação do diâmetro médio dos poros, que é obtido proporcionalmente a porosidade total e relacionada exclusivamente ao meio poroso. Nesta tese, o parâmetro que caracteriza o meio poroso (\sqrt{k}) é resultante do fenômeno que ocorre nos poros disponíveis ao escoamento do fluido, não se dissociam, e qualquer tentativa de analisar separadamente, porosidade e escoamento, incorre em “erros” comumente vistos na literatura.

Desse modo, nota-se a necessidade de uma abordagem experimental, de modo a investigar o comportamento hidráulico para os diferentes meios porosos possíveis de formação no concreto permeável, verificando a influência da heterogeneidade do meio poroso no escoamento, e avaliando os parâmetros hidráulicos obtidos, assim como o grau de dispersão destes dados.

5.3 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: DADOS EXPERIMENTAIS

Neste item, os parâmetros hidráulicos foram obtidos através dos traços experimentais produzidos e caracterizados na Fase III (item 3.2.3), com diferentes relações P/Ag, sendo o CP35HU(30), CP45HU(30), CP55HU(30) e CP65HU(30). Destaca-se que a abordagem metodológica, fundamentada pelas equações derivativas de Forchheimer, são suficientes para caracterizar o escoamento do concreto permeável não apenas nas condições testadas, mas para qualquer outra situação de fluxo, como verificado nas análises dos dados obtidos na literatura. Os coeficientes a e b da equação de Forchheimer para cada CP de concreto permeável foram obtidos através do uso do método dos mínimos quadrados em função dos resultados experimentais, como pode ser observado na Figura 53, com a relação entre o gradiente hidráulico e a velocidade média do fluxo: (a) CP35HU(30), (b) CP45HU(30), (c) CP55HU(30) e (d) CP65HU(30).

FIGURA 53 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE MÉDIA DO FLUIDO: EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER



A partir das constantes quadráticas (a e b) da equação de Forchheimer foi possível obter os parâmetros hidráulicos do escoamento (\sqrt{k} , d e d/\sqrt{k}). Estes parâmetros podem ser observados na Tabela 23, além dos dados das porosidades total (P_t) e efetiva (P_e) de cada amostra, obteve-se o índice de conectividade dos poros (P_e/P_t).

TABELA 23 - DADOS HIDRÁULICOS: TRAÇOS EXPERIMENTAIS

Traços	Corpos de prova	P_t (%)	P_e (%)	P_e/P_t (-)	a (s/m)	b ($10^3 \text{ s}^2/\text{m}^2$)	\sqrt{k} (10^{-5} m)	d (10^{-5} m)	d/\sqrt{k} (-)
CP35HU(30)	(01)	28,32	21,96	0,79	34,77	2,70	5,41	7,75	1,43
	(02)	27,60	21,65	0,79	23,95	3,10	6,52	12,9	1,98
	(03)	29,27	23,75	0,83	19,23	2,26	7,28	11,7	1,61
	(04)	29,04	23,30	0,79	46,14	1,77	4,70	3,83	0,815
	(05)	29,82	23,36	0,77	24,98	2,41	6,39	9,64	1,51
	(06)	27,85	21,84	0,79	28,83	3,04	5,95	10,5	1,77
	<i>Média</i>	<i>28,65</i>	<i>22,64</i>	<i>0,79</i>	<i>29,65</i>	<i>2,54</i>	<i>6,04</i>	<i>9,39</i>	<i>1,52</i>
	<i>(DP)</i>	<i>(0,87)</i>	<i>(0,92)</i>	<i>(0,02)</i>	<i>(9,61)</i>	<i>(0,51)</i>	<i>(0,90)</i>	<i>(3,24)</i>	<i>(0,40)</i>
CP45HU(30)	(01)	28,86	24,83	0,86	10,03	3,69	10,1	36,7	3,65
	(02)	27,64	23,94	0,86	28,76	3,99	5,95	13,9	2,33
	(03)	27,57	23,68	0,86	37,60	3,78	5,20	10,0	1,93
	(04)	29,37	25,08	0,86	22,40	3,11	6,75	13,9	2,06
	(05)	27,64	23,11	0,82	23,04	4,59	6,65	19,9	3,00
	(06)	27,53	24,64	0,89	39,03	2,63	5,11	6,74	1,32
	(07)	28,81	23,94	0,83	19,36	4,10	7,25	21,2	2,92
	(08)	29,91	25,15	0,83	23,01	3,22	6,65	14,0	2,10
	(09)	30,15	26,42	0,87	18,31	2,94	7,46	16,1	2,15
	(10)	26,82	23,94	0,89	29,45	4,76	5,88	16,2	2,75
	(11)	28,10	24,83	0,89	35,98	2,80	5,32	7,79	1,46
	(12)	28,90	25,46	0,86	11,97	3,72	9,23	31,1	3,37
	<i>Média</i>	<i>28,44</i>	<i>24,58</i>	<i>0,86</i>	<i>24,91</i>	<i>3,61</i>	<i>6,80</i>	<i>17,29</i>	<i>2,42</i>
	<i>(DP)</i>	<i>(1,05)</i>	<i>(0,91)</i>	<i>(0,02)</i>	<i>(9,51)</i>	<i>(0,69)</i>	<i>(1,56)</i>	<i>(8,95)</i>	<i>(0,73)</i>
CP55HU(30)	(01)	20,97	16,55	0,81	111,3	39,95	3,03	35,9	11,9
	(02)	19,19	15,60	0,84	107,8	56,62	3,07	52,5	17,1
	(03)	23,42	18,46	0,78	51,71	18,73	4,44	36,2	8,16
	(04)	20,97	16,87	0,81	101,7	23,69	3,17	23,3	7,36
	(05)	22,64	18,46	0,78	39,44	13,95	5,08	35,4	6,96
	(06)	19,96	16,23	0,80	79,70	40,09	3,58	50,3	14,1
	(07)	19,35	15,09	0,79	89,44	81,67	3,38	91,3	27,1
	(08)	23,22	18,46	0,78	107,3	10,71	3,08	9,98	3,24
	(09)	21,31	17,38	0,81	121,2	21,33	2,90	17,6	6,07
	(10)	20,26	16,55	0,85	98,79	27,05	3,21	27,4	8,52
	(11)	18,37	15,47	0,83	96,96	77,58	3,24	80,0	24,7
	(12)	21,97	17,51	0,82	71,22	14,32	3,78	20,1	5,31
	<i>Média</i>	<i>20,97</i>	<i>16,89</i>	<i>0,81</i>	<i>89,71</i>	<i>35,47</i>	<i>3,50</i>	<i>40,00</i>	<i>11,71</i>
	<i>(DP)</i>	<i>(1,62)</i>	<i>(1,19)</i>	<i>(0,02)</i>	<i>(24,84)</i>	<i>(24,51)</i>	<i>(0,65)</i>	<i>(24,83)</i>	<i>(7,68)</i>
CP65HU(30)	(01)	18,96	16,11	0,84	127,0	23,00	2,83	18,1	6,39
	(02)	18,59	16,55	0,89	65,88	33,69	3,93	51,1	13,0
	(03)	23,07	20,05	0,87	45,35	10,89	4,74	24,0	5,06
	(04)	20,07	16,23	0,80	113,7	24,84	2,99	21,9	7,30
	(05)	23,80	20,37	0,83	69,65	13,46	3,83	19,3	5,05
	(06)	18,25	15,92	0,89	88,02	30,93	3,40	35,1	10,3
	(07)	22,77	19,10	0,83	30,91	15,67	5,74	50,7	8,83
	(08)	22,29	19,10	0,86	36,86	17,22	5,26	46,7	8,88
	(09)	23,44	19,61	0,87	62,45	11,54	4,04	18,5	4,57
	(10)	19,59	16,11	0,80	107,2	22,84	3,08	21,3	6,91
	(11)	18,46	15,92	0,89	85,84	28,06	3,45	32,7	9,48
	(12)	21,82	20,12	0,91	58,67	12,76	4,17	21,7	5,22
	<i>Média</i>	<i>20,93</i>	<i>17,93</i>	<i>0,86</i>	<i>74,29</i>	<i>20,41</i>	<i>3,96</i>	<i>30,09</i>	<i>7,58</i>
	<i>(DP)</i>	<i>(2,14)</i>	<i>(1,92)</i>	<i>(0,04)</i>	<i>(30,65)</i>	<i>(7,90)</i>	<i>(0,91)</i>	<i>(12,86)</i>	<i>(2,58)</i>

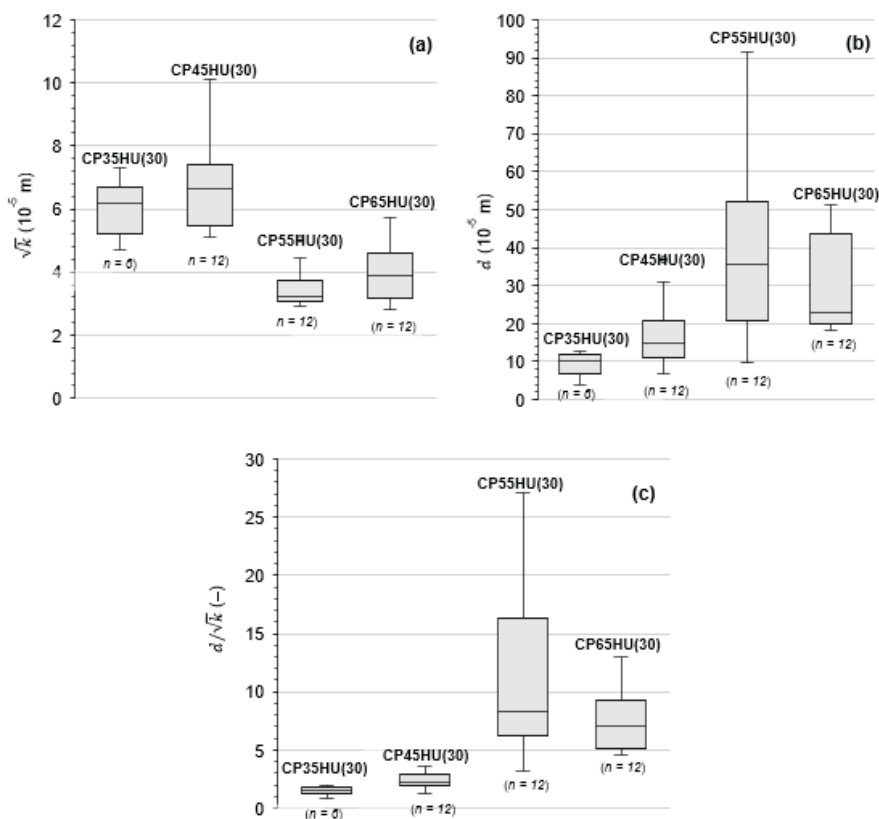
$$k = \frac{\mu}{\rho g a} ; d = g k b$$

Os parâmetros hidráulicos de escoamento (\sqrt{k} , d e d/\sqrt{k}), apresentados na Tabela 23, retratam que há uma notável variabilidade entre as amostras, ainda que

pertencentes ao mesmo traço. A correlação estabelecida, considerando os diferentes teores de P/Ag, buscou ressaltar a particularidade de cada meio poroso em seu escoamento, que está profundamente relacionada a sua heterogeneidade. Neste sentido, diferentes análises poderiam ser apresentadas, não só em função da relação P/Ag, mas, por exemplo, através das médias/desvios padrão de cada parâmetro hidráulico em relação as semelhantes porosidades totais. No entanto, novamente, como notável na Tabela 23, haveria um alto desvio padrão dos parâmetros hidráulicos, principalmente o que representa o comprimento característico do meio poroso (d). Desse modo, fica claro que a porosidade não é a única variável que influencia no escoamento, assunto discutido com maior ênfase posteriormente.

As médias e desvios padrão destes parâmetros hidráulicos, para cada traço, podem ser observados na Figura 54, representados através do *boxplot*, sendo a Figura 54a, 54b e 54c para os parâmetros \sqrt{k} , d e d/\sqrt{k} , respectivamente.

FIGURA 54 - RESULTADOS MÉDIOS/DESVIOS PADRÃO DOS PARÂMETROS \sqrt{k} , d E d/\sqrt{k}



Mais uma vez, uma clara segmentação foi detectada entre as misturas de concreto permeável com baixas relações P/Ag (CP35HU(30) e CP45HU(30)) e com

altas relações P/Ag (CP55HU(30) e CP65HU(30)). As misturas de CP35HU(30) e CP45(HU)30 resultaram em maiores valores de \sqrt{k} (Figura 54a), como era de se esperar, por apresentarem menores relações P/Ag e maiores porosidades. No entanto, os valores de \sqrt{k} para essas misturas apresentaram maior dispersão - portanto, não seguindo a tendência exibida por P_e e P_t (Figura 43a e 43b). Isso retrata que a permeabilidade intrínseca é um parâmetro distinto da porosidade na definição do escoamento, embora se correlacionem. As duas representam aspectos físicos do meio poroso, no entanto cada uma com sua particularidade.

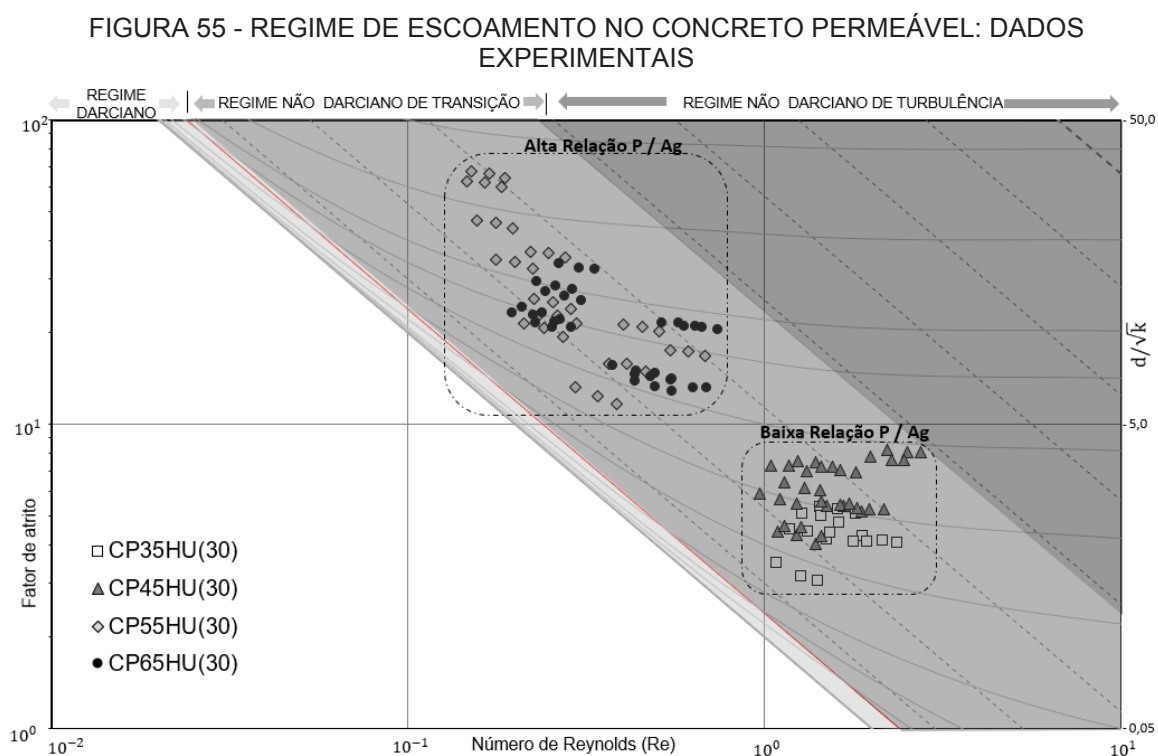
Os valores de \sqrt{k} obtidos até então, poderiam ser utilizados prontamente para caracterizar o escoamento se o regime do fluxo fosse Darciano, ou seja, se o comportamento do fluido fosse laminar resultante das baixas velocidades, conceito já exemplificado na Figura 18. Ainda, destaca-se que os valores médios, e respectivos desvios padrão, para cada parâmetro de permeabilidade (\sqrt{k} , d e d/\sqrt{k}) foram obtidos a partir da análise individual dos CPs de cada traço.

Em relação aos parâmetros hidráulicos, observa-se que o estado da arte carece de uma definição mais significativa para d . No entanto, d pode ser relacionado a um comprimento de caminho médio ou equivalente dentro do meio poroso; valores d mais altos significam resistências mais altas ao fluxo e maior dissipação de energia. Recomenda-se cautela sobre o uso de valores d para fazer afirmações sobre comprimentos de caminho médios e tortuosidade geométrica em meios porosos, uma vez que efeitos turbulentos desempenham um papel neste parâmetro (Lofrano *et al.* 2020). A Figura 54b mostra que d aumenta com a relação P/Ag , bem como sua dispersão - desta vez, da mesma maneira como observado em relação a P_e e P_t . Misturas com menos pasta (e mais vazios, como visto anteriormente) podem apresentar caminhos de fluxo mais “retos”, explicando o aumento do valor do parâmetro d com a relação P/Ag . Além disso, a aleatoriedade em que os vazios são preenchidos em cada CP conforme o conteúdo da pasta aumenta, parece induzir a heterogeneidade entre os caminhos de fluxo disponíveis. Isso está de acordo com as observações sobre a dispersão dos valores de P_e e P_t e pode explicar o comportamento apresentado pelos valores de d .

Conforme visto na Equação 20, um valor d/\sqrt{k} inferior significa um menor fator de resistência de fluxo $f_{\sqrt{k}}$. A Figura 54c mostra que misturas com menos pasta apresentaram menores valores de d/\sqrt{k} , juntamente com menor dispersão entre os

CPs. Ainda assim, o CP55HU(30) mostrou maiores valores de d/\sqrt{k} e de dispersão que em relação ao traço CP65HU(30). Isso pode ser devido a divergências durante a moldagem de alguns CPs, uma vez que a heterogeneidade do meio poroso é aleatória, única e altamente sensível as menores influências do nível de compactação, o que pode ter ocorrido neste traço.

O regime de escoamento no meio poroso é definido em função das características do fluido ao atravessá-lo, obtidos a partir dos parâmetros hidráulicos (\sqrt{k} , d e d/\sqrt{k}) e descritos através o fator de atrito ($f_{\sqrt{k}}$) e do número de Reynolds (Re). Os resultados referentes ao número de Reynolds e ao fator de atrito para cada CP são apresentados detalhadamente no Apêndice 3 e, aqui, ilustradas no diagrama $f_{\sqrt{k}} \times Re_{\sqrt{k}}$, como pode ser observado na Figura 55. Nota-se que para todos CPs ensaiados o regime de escoamento é não darciano de transição, ainda retratando que o parâmetro hidráulico adimensional d/\sqrt{k} é preciso e se ajusta bem na definição do escoamento do concreto permeável.



Primeiro, nota-se que os dados sempre aparecem em trio; isso porque eles se referem ao mesmo CP ensaiado em três diferentes gradientes hidráulicos. Além disso, eles podem ser divididos em dois grupos: baixas relações P/Ag (CP35HU(30))

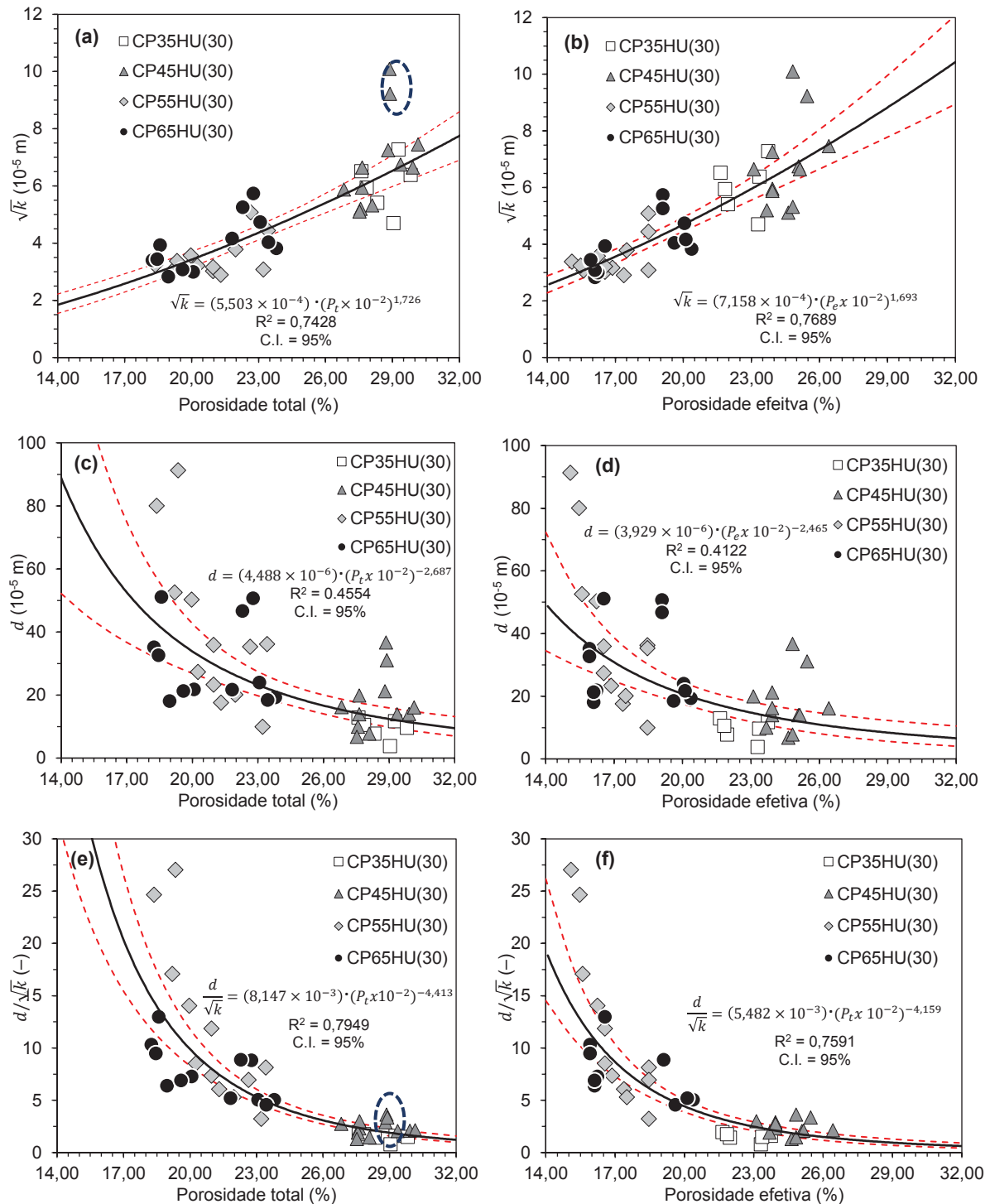
e CP45HU(30)) e altas relações P/Ag (CP55HU(30) e CP65HU(30)). O primeiro apresenta um comportamento mais consistente (menor dispersão). Nesse sentido, a Figura 55 corrobora com as discussões anteriores, e concede a análise dos regimes de fluxo. Dado que nenhum ponto experimental caiu no regime darciano, esta é mais uma demonstração da importância de se considerar a não linearidade do escoamento em aplicações de concreto permeável.

A partir dos pontos inseridos no diagrama, nota-se a sensibilidade do ábaco para representar o escoamento de um CP específico. Ainda que os CPs sejam obtidos do mesmo traço, cada meio poroso possui $d/raiz(k)$ distinto, reforçando que a formação do meio poroso é resultante de um processo aleatório e único, e isso reflete na particularidade de cada CP.

Inicialmente as correlações apresentadas na Figura 56 demonstram que o comportamento hidráulico dos CPs de concreto permeável não depende exclusivamente da relação P/Ag ; as mesmas amostras de mistura retratam valores de \sqrt{k} , d e d/\sqrt{k} significativamente diferentes. Assim, destaca-se a importância de maiores investigações sobre a influência da heterogeneidade do meio poroso nas propriedades hidráulicas do concreto permeável.

Foram realizadas regressões entre os diferentes parâmetros hidráulicos (\sqrt{k} , d e d/\sqrt{k}) e as porosidades (P_t e P_e) a fim de identificar as que melhor explicam o fenômeno do escoamento. As Figuras 56a, 56c e 56e (lado esquerdo) avaliam, respectivamente, as relações \sqrt{k} , d e d/\sqrt{k} em função da P_t , enquanto as Figuras 56b, 56d e 56f (lado direito) avaliam os mesmos três parâmetros em relação a P_e . Os comportamentos obtidos entre as variáveis foram semelhantes para cada um dos parâmetros de permeabilidade independente da medida de porosidade empregada. Embora o grau de correlação esteja muito próximo entre os parâmetros de permeabilidade, seja relacionado a P_t ou para P_e , a diferença nos valores de R^2 observados nas regressões de d/\sqrt{k} são mais pronunciadas e evidenciam a favor de P_t como uma medida preferível para a porosidade. Isso provavelmente está relacionado aos procedimentos metodológicos na determinação de P_e .

FIGURA 56 - RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DE PERMEABILIDADE E POROSIDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL



As Figuras 56a e 56b mostram que os valores de \sqrt{k} aumentaram com a porosidade. Essa tendência amplamente divulgada (ver Figura 15) era esperada. Com base no que foi observado na Figura 56a e 56b, uma tendência oposta em relação a d foi antecipada (ver Figuras 56c e 56d), visto que d aumenta nas menores

porosidades. Quanto maior a dispersão do parâmetro d , mais heterogêneo o meio poroso e sua conectividade. Dentre os possíveis fatores, a maior variabilidade dos traços com maiores relações P/Ag podem estar relacionadas ao fato dos poros serem proporcionalmente menos conectados, como pode ser observado na Figura 43d, onde à medida que aumenta a relação P/Ag , diminui a diferença entre P_t e P_e . Além disso, podem ser conectados via canais muito estreitos, o que também influenciaria na variabilidade do escoamento.

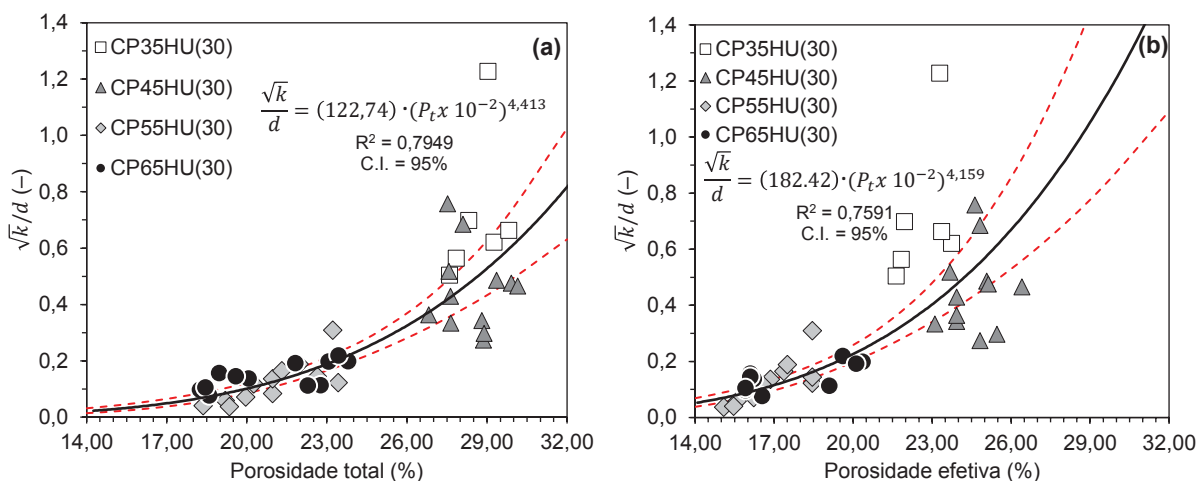
Nota-se na Figura 56e que a dispersão é mais pronunciada nas misturas CP55HU(30) e CP65HU(30) - exceto para dois CPs do traço CP45HU(30), dados os resultados apresentados não apenas para d , na Figura 56c, mas também para \sqrt{k} , que podem ser vistos como *outliers* à primeira vista, Figura 56a. Isso corrobora uma discussão anterior: a aleatoriedade envolvida no preenchimento de vazios concreto do concreto permeável à medida que o teor de pasta aumenta incorre em uma variabilidade entre caminhos de fluxo disponíveis e não disponíveis. Esta variabilidade se traduz, de alguma forma, nos valores d relatados.

As Figuras 56e e 56f mostram as regressões obtidas para d/\sqrt{k} . Valores de d/\sqrt{k} mais baixos significam uma menor resistência ao fluxo através do meio poroso (isto é, um valor $f_{\sqrt{k}}$ mais baixo). Espera-se menor resistência ao fluxo de concretos permeáveis com maior porosidade; isso explica a diminuição de d/\sqrt{k} com o aumento de P_t ou P_e . As regressões para d/\sqrt{k} resultaram em maiores valores de R^2 entre os três parâmetros de permeabilidade investigados. Além disso, os pontos experimentais, CP45HU(30), mencionados anteriormente que poderiam ser considerados *outliers*, dados seus resultados para \sqrt{k} e d , se ajustaram bem na plotagem dos dados de d/\sqrt{k} - explicando parte das altas correlações obtidas. Do ponto de vista deste parâmetro, tais pontos não podem ser considerados *outliers*. Isso afasta qualquer preocupação sobre um erro experimental nos testes de permeabilidade em relação a estes dois corpos de prova.

Embora o uso de d/\sqrt{k} esteja relacionado ao número de Reynolds e ao fator de resistência, a forma inversa deste coeficiente adimensional (ver Figura 57) é mais intuitiva para a análise do comportamento hidráulico do concreto permeável. Nesta outra configuração, os valores de \sqrt{k}/d aumentaram com a porosidade. Finalmente, embora \sqrt{k}/d tenha gerado a melhor precisão entre os parâmetros de permeabilidade

estudados, os coeficientes de correlação obtidos para as porosidades (acurácia de 0,46 e precisão de 0,53 para P_t , acurácia de 0,47 e precisão de 0,57 para P_e) indicam que por si só não explicam totalmente o comportamento hidrodinâmico estabelecido em concretos permeáveis, fato de importante consideração.

FIGURA 57- RELAÇÕES ENTRE \sqrt{k}/d E POROSIDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL



Desse modo, reforça-se a hipótese de que materiais com as mesmas porosidades e \sqrt{k} , podem ter escoamentos (d/\sqrt{k}) distintos, e que os fatores que influenciam não se trata apenas da porosidade do concreto permeável, mas da conformação do espaço poroso e de sua conectividade, influenciados pelo traço. Do ponto de vista da permeabilidade é mais seguro traços com relação P/Ag inferiores, pois possuem um comportamento mais consistente. Reforça-se o comportamento observado de que a formação do meio poroso é um processo aleatório, decorrente da compactação do concreto. Quando a porosidade é maior, é mais fácil para que haja um caminho para a água fluir e, na média, os caminhos entre as amostras são parecidos. Quando a porosidade diminui, diminuem as possibilidades de caminhos e, também, se tornam mais específicos. Isso explicaria, também, a variabilidade dos resultados.

A partir dos dados obtidos experimentalmente é realizado uma análise entre dois CPs de traços distintos (CP55HU(30) e CP65HU(30)), como pode ser observado na Tabela 24, com constantes lineares semelhantes, \sqrt{k} , no entanto com escoamentos distintos, em d/\sqrt{k} .

TABELA 24 - DADOS HIDRÁULICOS PARA MEIOS POROSOS: CP55HU(30) E CP65HU(30)

Referência	Composição do Meio Poroso	\sqrt{k} (m)	d/\sqrt{k} (m)
CP55HU(30)	Agregado uniforme (6,3 – 9,5 mm) envolvido com P/Ag de 0,55	$3,00 \times 10^{-5}$	24,68
CP65HU(30)	Agregado uniforme (6,3 – 9,5 mm) envolvido com P/Ag de 0,65	$3,00 \times 10^{-5}$	10,32

Desse modo, nota-se que o comportamento do fluido no concreto permeável tem fundamento nas questões levantadas por Lofrano *et al.* (2020). Estes autores atribuem significado físico para qualquer meio poroso, retratando que d não é apenas o comprimento característico do meio poroso, mas sim de como a conformação do espaço poroso determina a dissipação de energia cinética quando o escoamento deixa de ser darciano. Assim, é possível que o escoamento em meios porosos distintos, mas com um mesmo k , seja semelhante na zona linear, mas distinto em velocidades elevadas, quando d passa a exercer influência.

Nesse sentido, a porosidade do meio, independentemente dos materiais utilizados, não é determinante no comportamento hidráulico do concreto permeável, mas sim a conformação e conectividade dos canais de propagação do fluido. Assim, o escoamento do fluido no meio poroso, aqui em específico o concreto permeável, deve ser caracterizado não mais pelo coeficiente de permeabilidade, ou pela permeabilidade intrínseca ao meio poroso ($k (L)$), derivados da constante linear, a , da equação de Forchheimer, mas a partir da relação do fluido com o meio poroso heterogêneo, definido pelos parâmetros de d/\sqrt{k} .

Além das análises acima realizadas, percebe-se a necessidade de maior correlação entre as áreas da mecânica dos fluidos com a área da tecnológica dos materiais. Áreas distintas, mas que se complementam em suas diversas abordagens. Com o intuito de facilitar o entendimento do leitor em relação a análise do escoamento do concreto permeável, algumas analogias foram propostas para interpretação das características hidráulicas do material.

Considera-se \sqrt{k} a largura de uma estrada de tráfego de veículos (que corresponde ao diâmetro do poro) e d a sinuosidade dessa estrada, ou seja, suas curvas. Deste modo, um tráfego de baixa velocidade, em uma estrada larga e com poucas curvas, ninguém precisa frear bruscamente em cima da curva, escoamento segue laminar. À medida que a velocidade do tráfego aumenta, ou essa estrada se

torna mais sinuosa, aumenta a chance dos carros baterem, gerando “turbulência”. Resumidamente, o gráfico d/\sqrt{k} , Figura 56e, retrata que o fato de ter duas estradas com a mesma largura, (\sqrt{k}) , e os carros na mesma velocidade, não garante que o escoamento seja o mesmo, pois na estrada mais sinuosa, (d) , a desaceleração vai ocorrer e o escoamento vai ser menor e, ainda, quanto mais aumentar a velocidade nessa estrada, mais o escoamento vai ser distinto.

Em regimes darcianos, onde há linearidade entre gradiente hidráulico e velocidade, o coeficiente de permeabilidade é o mesmo, mas basta aumentar a velocidade que um deles terá maior perda de carga, ou maior dissipação da energia cinética do fluido, e o escoamento passa a ser não linear. Isso mostra que o regime darciano não é suficiente para caracterizar as condições de fluxo em altas velocidades em meios porosos. Quando o escoamento se torna não linear, o parâmetro k já não é suficiente para caracterizá-lo. Ou seja, a estrada pode ser larga e sem movimento, mas se for muito sinuosa, a desaceleração vai ocorrer, assim como a geração de “turbulência”.

Contudo, parece ser um contrassenso: se a capacidade de desenvolver um escoamento (“permeabilidade” em um sentido amplo) depende apenas do meio poroso, por que precisaria variar o gradiente para determinar essa propriedade? A resposta é que, no fundo, o parâmetro hidráulico que realmente importa é o fator de atrito — e este depende, assim como em tubos e/ou canais, da geometria do meio, mas, também, de parâmetros do fluido (viscosidade, massa específica) e características do escoamento (velocidade/vazão e gradiente hidráulico).

A homogeneidade/heterogeneidade da matriz sólida é diferente daquela do espaço poroso que se forma no concreto. Ao avaliar o escoamento através de um meio poroso, deve-se ter em mente que o importante é a homogeneidade/heterogeneidade da matriz porosa. Quando a porosidade é maior, há uma menor dispersão do parâmetro hidrodinâmico d/\sqrt{k} . Portanto, os resultados indicam que, em meios mais porosos, o espaço poroso deve ser mais homogêneo, fornecendo mais caminhos possíveis e diminuindo o efeito de uma ou outra restrição mais severa ao escoamento (agregados mais próximos em algum ponto). Quando a porosidade é menor, há menos espaço poroso e, por conseguinte, menos opções de rotas para o escoamento. Logo, mesmo a menor alteração entre dois CPs e que

resulte em uma maior obstrução em um ponto específico do espaço poroso acaba por afetar a propriedade do escoamento, isto é, o parâmetro d/\sqrt{k} .

5.4 MUDANÇA DE FILOSOFIA DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS

A presente tese apresenta uma nova metodologia para a caracterização do escoamento através do concreto permeável.

As considerações até então utilizadas na determinação das propriedades hidráulicas do concreto permeável foram que o escoamento é darciano. É essa a única e comum consideração que leva ao resultado (absurdo) de que um mesmo meio possa apresentar diferentes propriedades para um mesmo fenômeno. Isso quer dizer que o fenômeno não é corretamente obtido por tal consideração. Qual a serventia de um método ou sistema de caracterização que seja incapaz de caracterizar algo de maneira unívoca? Assim, são necessárias outras considerações, mais elaboradas.

Neste momento é que as considerações de Ahmed e Sunada (1969), através da equação de Forchheimer, foram potentes na definição do escoamento em concreto permeável, permitindo a definição de duas propriedades hidráulicas (d e \sqrt{k}) de modo inequívoco, para todas as condições de vazão e gradiente testadas. A partir das formulações propostas, na hipótese do escoamento ser laminar, o equacionamento de Forchheimer pode ser reduzido a Lei de Darcy, e os valores também servem para baixas velocidades, como pode ser observado na Figura 18. Assim, é prudente empregar um modelo hidrodinâmico que preveja a possibilidade do escoamento estar em regime não linear, a fim de evitar os distintos coeficientes de permeabilidade para o mesmo meio poroso.

Em relação a avaliação das propriedades hidráulicas do concreto permeável, duas situações podem ser mencionadas: avaliação *in situ* e em laboratório. Embora as duas situações sejam distintas, a maneira de avaliar suas características hidráulicas, assim como seus parâmetros hidráulicos, devem ser a mesma. Quando aumenta a lâmina d'água sobre o pavimento, aumenta, conseqüentemente, a carga hidráulica. Conforme a revisão bibliográfica (dados de Qin *et al.* 2015) e os próprios resultados desta tese, este aumento conduziu a um regime não linear de escoamento. A partir da interpretação dos dados de Qin *et al.* (2015) observa-se que este aumento nem sequer precisa ser tão elevado para que a mudança de regime ocorra. Quando

isso acontece, o modelo darciano, tradicionalmente empregado, passa a: 1) não fornecer uma resposta unívoca sobre o comportamento hidráulico do escoamento que atravessa o concreto permeável e 2) pode conduzir a um subdimensionamento do concreto permeável (do ponto de vista hidráulico), pois a turbulência fará com que a dissipação de energia real seja maior do que aquela admitida pela lei de Darcy e congêneres (como a eq. de Kozeny-Carman) — consequentemente, para uma mesma carga hidráulica, as velocidades e vazões observadas serão menores do que as previstas.

Desse modo, é necessário que haja clareza sobre o regime de escoamento sob o qual tais materiais são ensaiados em laboratório, sob o risco de se determinar um parâmetro darciano em uma situação não darciana. Mais que isso, a determinação das características de escoamento não linear não impede a avaliação de seu comportamento sob condições darcianas; pelo contrário, podem ser até mais eficientes, do ponto de vista laboratorial, posto que podem ser realizados mais rapidamente – maiores gradientes hidráulicos levam a maiores vazões. Ainda que um determinado concreto permeável venha a operar sob condições sabidamente darcianas, é fundamental que suas propriedades sejam determinadas segundo uma metodologia adequada às condições experimentadas em laboratório.

5.5 CAMPANHAS EXPERIMENTAIS COMPLEMENTARES

Dando prosseguimento ao estudo do escoamento no concreto permeável, decidiu-se realizar a mesma abordagem metodológica levando em consideração uma generalidade de traços com diferentes materiais constituintes, seja pelas distintas relações a/c e diferentes características físicas dos agregados, - faixa granulométrica contínua e uniforme – além dos diferentes tipos de compactação, - haste e vibração - de modo avaliar se as considerações adotadas abrangem a diferentes meios porosos de concreto permeável.

5.5.1 Materiais e métodos

Na Tabela 25 pode ser observado um resumo dos traços produzidos neste estudo em que foram possíveis mensurar o escoamento em permeâmetro de carga constante, com as respectivas relações P/Ag e consumo dos materiais. Essa abordagem tem por objetivo verificar se os diferentes materiais constituintes e diferentes tipos e níveis de adensamento influenciam nas propriedades hidráulicas dos materiais. Desse modo, adicionou-se a análise já realizada no item anterior, os dados do concreto permeável compactado por vibração (V) e produzidos com a utilização de faixa granulométrica continua (C).

TABELA 25 – CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL: CONSUMO DE MATERIAIS DOS TRAÇOS

Nomenclatura	Relação P/Ag em massa	Consumo de brita (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço em massa		
				Cimento	Brita	a/c
CP36HC(30)	0,36	1411,05	396,73	1	3,56	0,3
CP42HC(30)	0,42	1336,98	439,28	1	3,04	0,3
CP36VC(30)	0,36	1377,80	377,25	1	3,65	0,3
CP42VC(30)	0,42	1318,08	422,67	1	3,12	0,3

(V: Vibração; C: Faixa granulométrica continua)

O método de produção destes traços foi descrito no item 1.1, do Apêndice 4. Os ensaios de caracterização foram realizados de acordo com o descrito no item 3.3, a partir da porosidade total e efetiva, assim como os ensaios de caracterização hidráulica em permeâmetro de carga constante.

Ainda que todos CPs produzidos foram submetidos a avaliação de seu comportamento hidráulico, destaca-se que a leitura não foi possível para a situação de alta porosidade, - superior a 30% - em função da capacidade laboratorial em fornecer uma vazão suficiente para a demanda experimental.

5.5.2 Resultados

Na Tabela 26 pode ser observado um resumo das principais propriedades hidráulicas do concreto permeável produzidos com diferentes métodos de

compactação e diferentes características físicas dos agregados, com dados relativos à porosidade total, e vazão para cada gradiente hidráulico ensaiado.

TABELA 26 - POROSIDADE E PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL COM DIFERENTES MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO

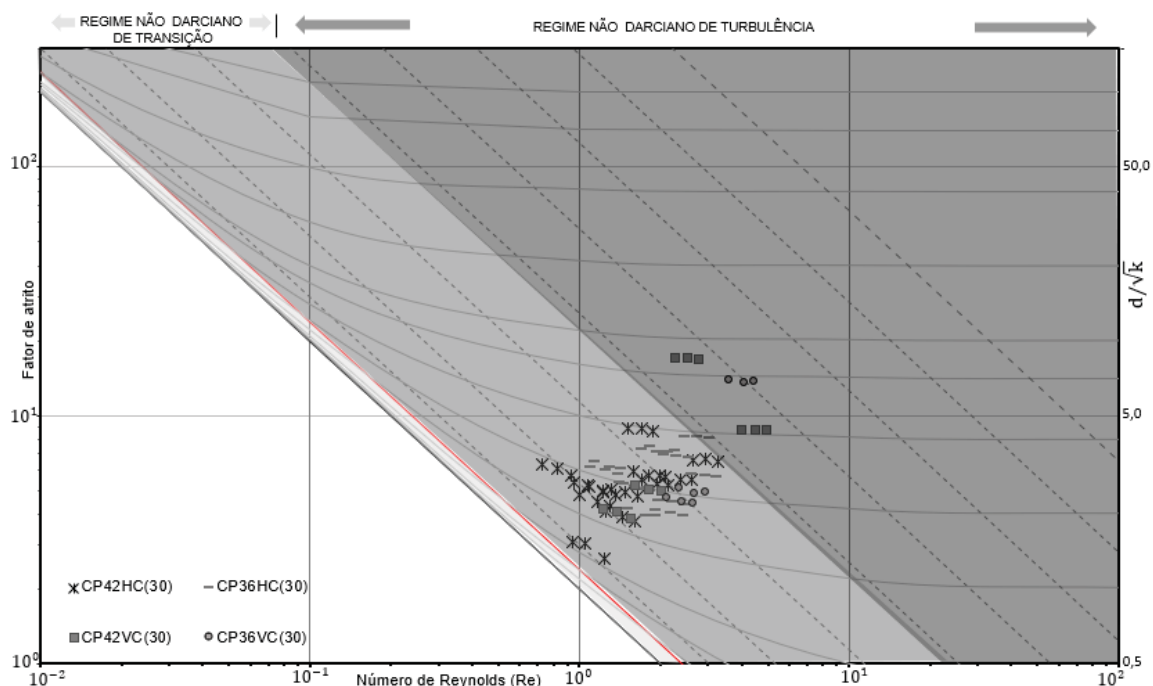
Traço	Porosidade total (%) (σ)	Propriedades hidráulicas: Vazão (l/s) (σ)		
	Total	ΔH : 20 cm	ΔH : 30 cm	ΔH : 40 cm
CP36HC(30)	26,34 (1,13)	0,176 (0,019)	0,200 (0,021)	0,221 (0,023)
CP42HC(30)	26,32 (1,52)	0,171 (0,022)	0,194 (0,024)	0,213 (0,024)
CP36VC(30)	28,52 (1,53)	0,226 (0,029)	0,239 (0,022)	0,244 (0,024)
CP42VC(30)	28,19 (1,61)	0,186 (0,028)	0,207 (0,033)	0,212 (0,023)

A partir dos resultados apresentados, não há dúvida que os materiais constituintes, assim como o tipo de compactação, influenciam nas propriedades hidráulicas do concreto permeável, ainda que as porosidades totais sejam semelhantes.

5.5.3 Regime de escoamento do concreto permeável

Como pode ser observado no diagrama $f_{\sqrt{k}} \times Re_{\sqrt{k}}$, Figura 58, o regime de escoamento não linear é uma característica predominante do concreto permeável. Nota-se que independentemente do tipo de compactação e do material utilizado, a metodologia abordada nesta tese é válida e segura para estabelecer interpretações do comportamento hidráulico de qualquer CP de concreto permeável. Os dados referentes ao número de Reynolds e fator de atrito para cada CP, são apresentadas no Apêndice 3.

FIGURA 58 - DIAGRAMA DO REGIME DE ESCOAMENTO NO CONCRETO PERMEÁVEL: GENERALIDADE DOS TRAÇOS EXPERIMENTAIS



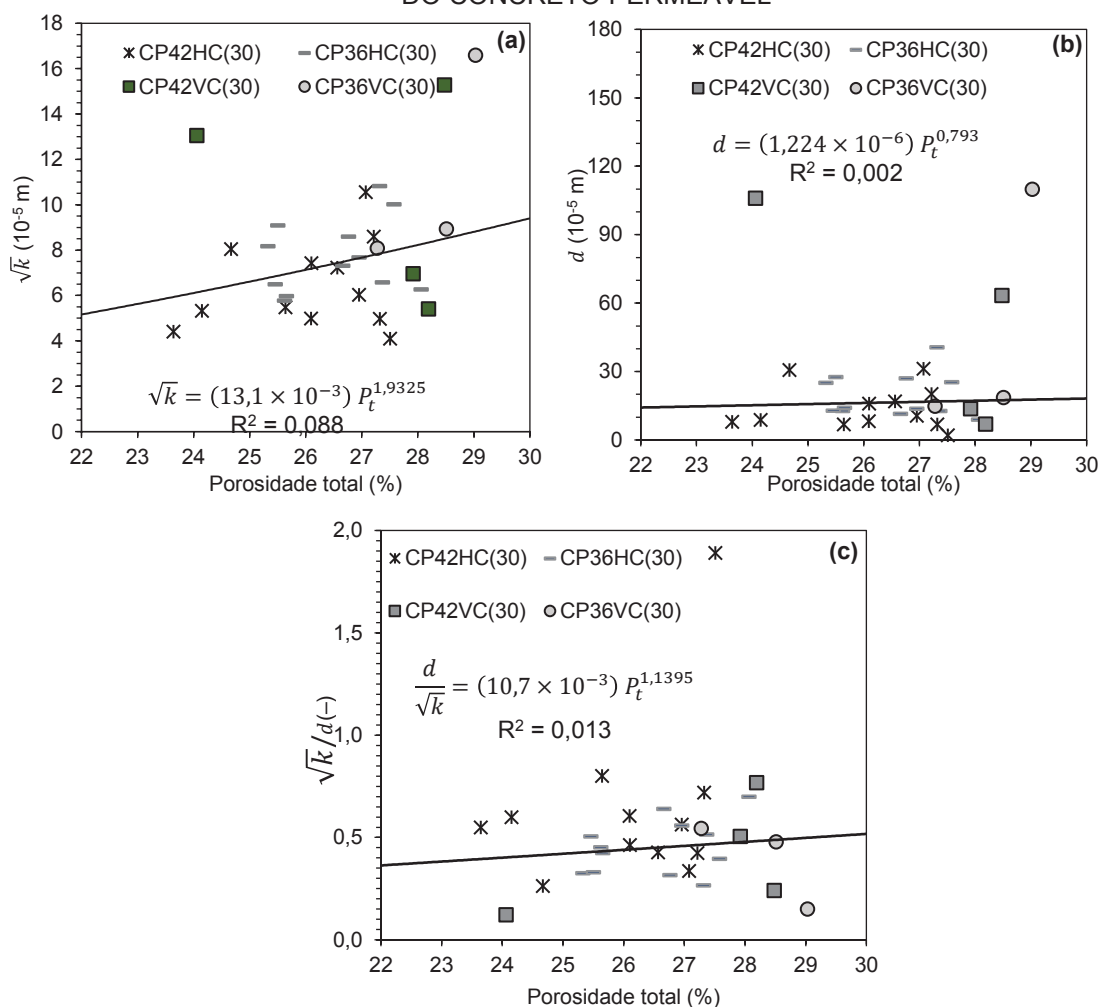
A partir dos pontos inseridos, reforça-se a sensibilidade do diagrama para representar o escoamento de um CP específico. Dado que nenhum ponto experimental caiu no regime de darciano, esta é mais uma demonstração da importância de se considerar a não linearidade do escoamento em aplicações de concreto permeável. A Figura 58 corrobora com as discussões anteriores, retratando que três CPs dos traços CP36VC(30) e CP42VC(30) renderam um fluxo não darciano totalmente turbulento.

Estes CPs diferenciam-se dos demais em relação a sua compactação que foi por vibração. Nestes CPs, nota-se particularidades em relação a sua conectividade, o qual há maior proximidade entre os valores da P_t e P_e , reflexo de um adensamento menos efetivo, onde há uma marcante presença de vazios laterais de maiores dimensões em relação a compactação por haste. Além disso, tudo indica que meios porosos com reduzida porosidade, os efeitos inerciais e de velocidade do escoamento são consideravelmente mais significativos, onde maiores são as influências do fator de atrito nos condutos de menores diâmetros, ocasionando turbulência. Essas observações fazem parte do rol das motivações que demonstram a necessidade de estudos mais completos e abrangentes das relações que envolvem a porosidade total, efetiva e isolada dos meios porosos, assim como da sua influência no escoamento.

5.5.4 Correlação dos parâmetros hidráulicos de permeabilidade e porosidade total

A fim de analisar a influência da heterogeneidade do meio poroso nas propriedades hidráulicas do concreto permeável, este tópico traz uma análise dos traços experimentais supracitados, retratando, como esperado, que as características do escoamento não dependem exclusivamente dos materiais utilizados em sua confecção e nem do tipo de compactação, o qual os parâmetros hidráulicos de \sqrt{k} , d e \sqrt{k}/d mostram-se significativamente diferentes ainda que CPs do mesmo traço, no entanto, ainda assim, há um considerável delineamento na definição de suas características hidráulicas, como pode ser observado na Figura 59. Nesta análise, as regressões foram realizadas entre os parâmetros hidráulicos (\sqrt{k} , d e \sqrt{k}/d e a P_t , como uma medida preferível para a porosidade, como pode ser observado nas Figuras 59a, 59b e 59c, respectivamente.

FIGURA 59 - RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS DE PERMEABILIDADE E POROSIDADE TOTAL DO CONCRETO PERMEÁVEL



A alta dispersão de dados de cada traço reforça que cada CP tem uma característica única de escoamento, independentemente de serem, ou não, constituintes de agregados com diferentes características físicas, ou tipos de compactação. Ressalta-se que a evidente influência do método de compactação sobre o desempenho hidráulico do concreto permeável deve ser uma questão abordada, principalmente, em relação a aplicação *in loco*, onde concretos permeáveis podem ter seus poros obstruídos na face de entrada.

A acentuada diferença entre as características físicas desses CPs mostrou que o parâmetro porosidade total não foi suficiente para definir um comportamento. A baixa correlação (R^2) não invalida nenhum dos dados de \sqrt{k}/d obtidos, em nenhuma hipótese podem ser considerados erros experimentais. Contrário a isso, demonstram ainda mais a importância da utilização do parâmetro hidráulico \sqrt{k}/d para caracterizar o escoamento de cada CP de concreto permeável, independentemente da sua relação com a porosidade total.

Assim, a notável aleatoriedade envolvida na formação do meio poroso, principalmente devido aos CPs compactados por vibração¹³, não refletiu em um bom ajuste do parâmetro \sqrt{k}/d com a porosidade total. Destaca-se que na análise do subitem 5.3, a correlação foi mais segura para explicar o escoamento quando analisado um maior número de CPs, com maior amplitude dos valores da P_t , de 12%, contrário a esta última análise com variação de até 5%.

¹³ Os CPs de concreto permeável compactados por vibração tiveram vazios superficiais maiores que em relação a compactação por haste. Acredita-se que estes vazios podem ter influenciado na característica do escoamento quando em contato com a célula de confinamento (papel filme/fita adesiva). Ou seja, a alta porosidade na superfície lateral pode ter promovido escoamentos desregrados entre estes CPs, desse modo, pouco importa se este conjunto de dados pertencem ao mesmo traço, ou tenha alguma semelhança em relação ao seu processo de produção. Destaca-se, no entanto, que o escoamento (\sqrt{k}/d) obtido em cada um destes CPs está bem definido e o caracteriza hidráulicamente.

6 ANÁLISE NUMÉRICA

A fim de complementar a análise das propriedades hidráulicas do concreto permeável, e fundamentar bases que corroborem para a correta interpretação de seu escoamento, este capítulo busca investigar seu comportamento através de uma simulação numérica da dinâmica dos fluidos computacional (DFC). Essa simulação permitirá calcular a distribuição vertical da velocidade de fluxo em função da pressão (gradiente hidráulico) aplicada, o que é difícil obter experimentalmente.

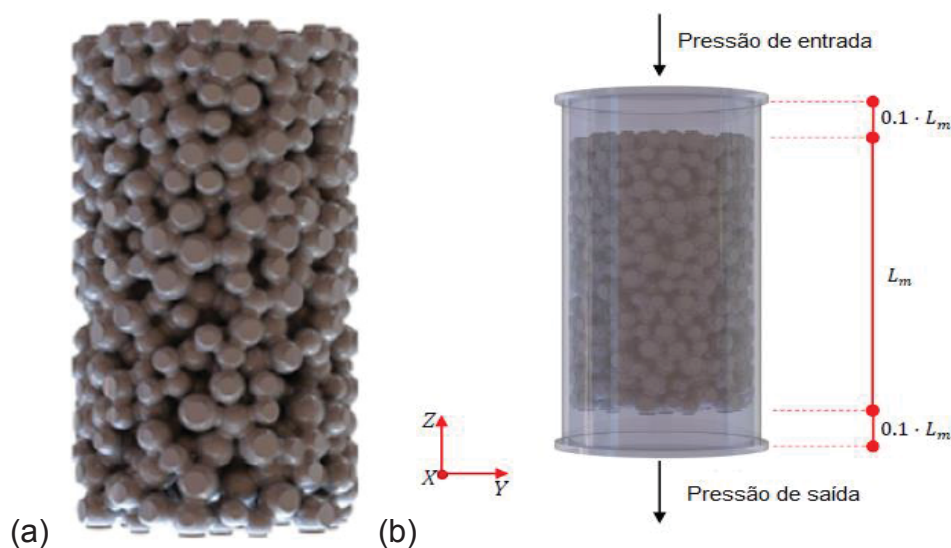
A simulação numérica foi realizada pelo software *SolidWorks Flow Simulation*. Este software resolve as equações de Navier-Stokes para prever o fluxo de regimes laminares e turbulentos.

6.1 MODELO GEOMÉTRICO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A simulação computacional foi realizada em um sólido geométrico representando o concreto permeável, sendo este modelo obtido dos estudos realizados por Pieralisi, Cavalaro e Aguado (2017). A partir das propriedades geométricas de cada partícula, e a ponte de contato para cada interação, um código VBA (integrado ao *SolidWorks*) gerou o sólido geométrico, como pode ser observado na Figura 60a, consistindo em um volume unificado de todas as partículas, com uma porosidade total de 27%, com diâmetro de 0,05 m e altura de 0,08 m, além de uma rugosidade aplicada em sua superfície de 20,0 μm , sendo está adotada a partir das considerações de Apedo *et al.* (2015).

As simulações foram realizadas com diferentes pressões estáticas como dados de entrada, correspondendo aos níveis de água do permeâmetro de carga constante. Neste estudo, o fluido foi definido como água a 25° C. A constante gravitacional foi assumida como 9,81 m/s^2 na direção Z, paralela ao eixo das amostras cilíndricas. Na Figura 60b pode ser observado que as condições de contorno impostas foram as pressões de entrada e saída prescritas nos planos superior e inferior normais na direção z. A fim de verificar o comportamento do escoamento, a pressão aplicada variou de 489,30 Pa até 14.679,09 Pa, corresponde a variação do gradiente hidráulico de 1,62 a 19,75 m/m , realizando no total doze simulações computacionais variando a coluna de água de 0,05 a 1,5m.

FIGURA 60- SIMULAÇÃO NUMÉRICA: (A) MODELO GEOMÉTRICO DO CONCRETO PERMEÁVEL
(B) CONDIÇÕES DE CONTORNO



FONTE: Adaptado de Pieralisi, Cavalaro e Aguado (2017).

6.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM DIFERENTES CARGAS HIDRÁULICAS

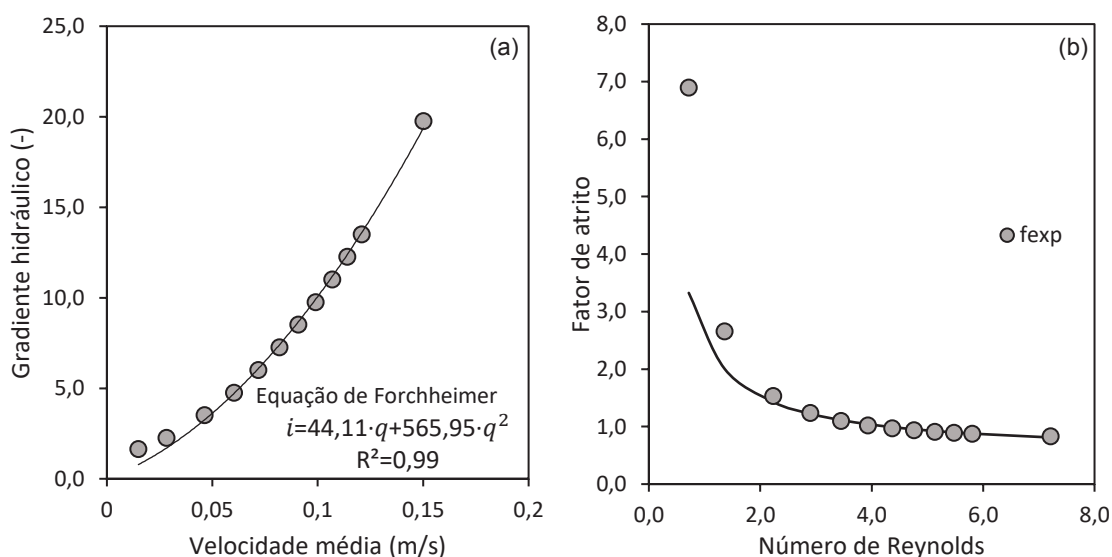
A fim de verificar o comportamento do escoamento, foi extraída da simulação linhas de fluxo de doze diferentes pressões em permeâmetro de carga constante, simulando gradientes hidráulicos da ordem de 19,75 m/m. Assim, a partir do modelo geométrico do concreto permeável, obteve-se os resultados de vazão para cada pressão aplicada, permitindo, determinar a velocidade do fluxo. A Tabela 27 apresenta os resultados da vazão do fluido para todas as pressões simuladas e seus respectivos gradientes hidráulicos.

TABELA 27 – DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO NO MODELO GEOMÉTRICO

Pressão (Pa)	Gradiente hidráulico (m/m)	Vazão (10^{-5} m ³ /s)	Velocidade média (10^{-3} m/s)
489,30	1,62	2,92	14,91
978,61	2,25	5,55	28,29
1957,21	3,50	9,12	46,43
2935,82	4,75	11,84	60,28
3914,43	6,00	14,09	71,78
4893,03	7,25	16,07	81,85
5871,64	8,50	17,85	90,89
6850,24	9,75	19,45	99,06
7828,85	11,00	20,98	106,85
8807,46	12,25	22,39	114,02
9786,06	13,50	23,72	120,82
14679,10	19,75	29,47	150,09

Na Figura 61 pode ser observado os dados hidráulicos do escoamento no modelo geométrico, com as correlações entre as velocidades do fluido obtidas para seus respectivos gradientes hidráulicos, permitindo obter os coeficientes a e b da equação de Forchheimer através do uso do método dos mínimos quadrados. O comportamento não linear pode ser observado na Figura 61a. Assim, a partir deste comportamento, descrito pela equação de Forchheimer, com correlação (R^2) de 0,99, são obtidas as constantes quadráticas $a = 44,15$ e $b = 565,95$, que permitem calcular o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito para cada carga hidráulica ensaiada, como pode ser observado na Figura 61b.

FIGURA 61 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE MÉDIA (A) E FATOR DE ATRITO E NÚMERO DE REYNOLDS (B): MODELO GEOMÉTRICO



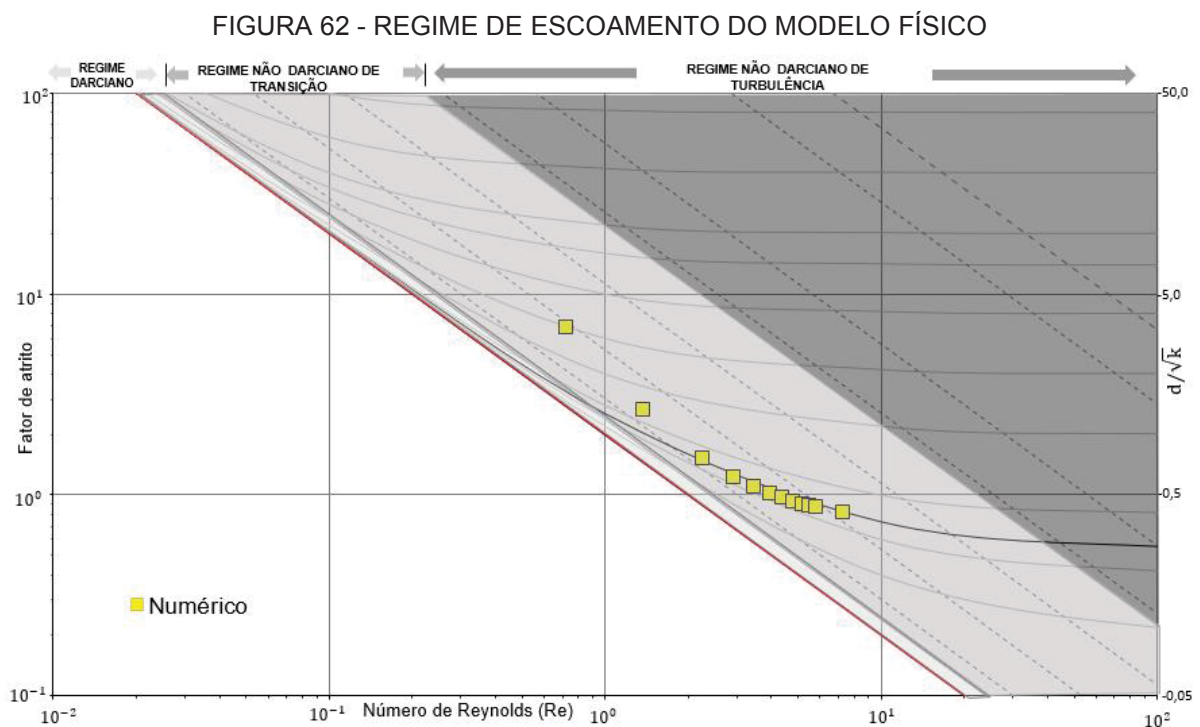
A simulação numérica computacional resultou em um escoamento não linear, corroborando com as conclusões obtidas no Capítulo 5. Na Figura 61a já é possível ver um desvio com relação de Forchheimer nos pontos de menor velocidade. Um motivo para a piora no ajuste desta região é a de que os valores menores pesam menos no ajuste dos mínimos quadrados, que se enviesará para os valores maiores.

Destaca-se que o modelo geométrico utilizado na simulação, validado por Pieralisi, Cavalaro e Aguado (2017), possui uma distribuição da porosidade diferente dos CPs produzidos experimentalmente, no entanto o real interesse desta abordagem foi verificar se o comportamento do escoamento é mantido. Assim, a partir simulação computacional, o escoamento do modelo físico, levando em consideração sua heterogeneidade, puderam ser caracterizados através dos parâmetros hidráulicos d ,

k e $d/\text{raiz}(k)$, correspondentes a $1,28 \times 10^{-5} \text{ m}$, $2,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ e 0,26, respectivamente.

6.2.1 Regime do escoamento do concreto permeável

A verificação do regime de escoamento do fluido no meio poroso pode ser observada através do diagrama representado na Figura 62.



Nota-se que para todos os gradientes hidráulicos, o regime de escoamento permaneceu não darciano de transição, ainda tomando-se o ponto de maior número de Reynolds na análise adimensional, essa simulação não alcançou um limite que se pode afirmar como sendo de escoamento plenamente turbulento. Nesta situação obtida, tanto a viscosidade quanta a geometria do meio poroso, são mecanismos relevantes na dissipação de energia. Nos casos extremos do fluxo ser plenamente laminar ou turbulento, a abordagem de Forchheimer poderia ser simplificada. Na situação do regime laminar, $i = a \cdot q$, o termo $a (= \frac{\mu}{\rho g h})$ depende das características do fluido (ρ e μ) e do escoamento (q). Já no caso do regime plenamente turbulento, a equação de Forchheimer poderia ser simplificada em $i = b \cdot q^2$, sendo o termo $b (=$

$\frac{1}{gcd}$) relacionado apenas nos parâmetros d e \sqrt{k} , intrínsecos a heterogeneidade do meio poroso. Desse modo, em uma situação em que o fluxo é plenamente turbulento, a velocidade do fluido será preponderante na perda de carga do escoamento, uma vez que, neste caso, o fator de atrito é constante.

O ajuste da lei de Forchheimer foi bem-sucedido, e o comportamento apresentou-se como não linear para gradientes hidráulicos da ordem de 20 m/m. Pode-se afirmar que o diagrama é sensível as equações utilizadas para estimar o fator de atrito, com a predominante sobreposição dos pontos experimentais preservando o mesmo escoamento (d/\sqrt{k}). No entanto, ressalta-se que os dois pontos ensaiados com menores cargas/velocidades não se ajustaram bem. Dentre as possíveis hipóteses, pode estar relacionada ao modelo de turbulência utilizado para modelar escoamentos em meios porosos.

Assim, o estudo confirma que é possível usar modelos analíticos e numéricos avançados para encontrar soluções em reduzindo tempo, esforços e custos necessários. Desse modo, dado a impossibilidade de se ensaiar uma ampla faixa de cargas hidráulicas distintas experimentalmente, a simulação computacional torna-se uma ferramenta viável.

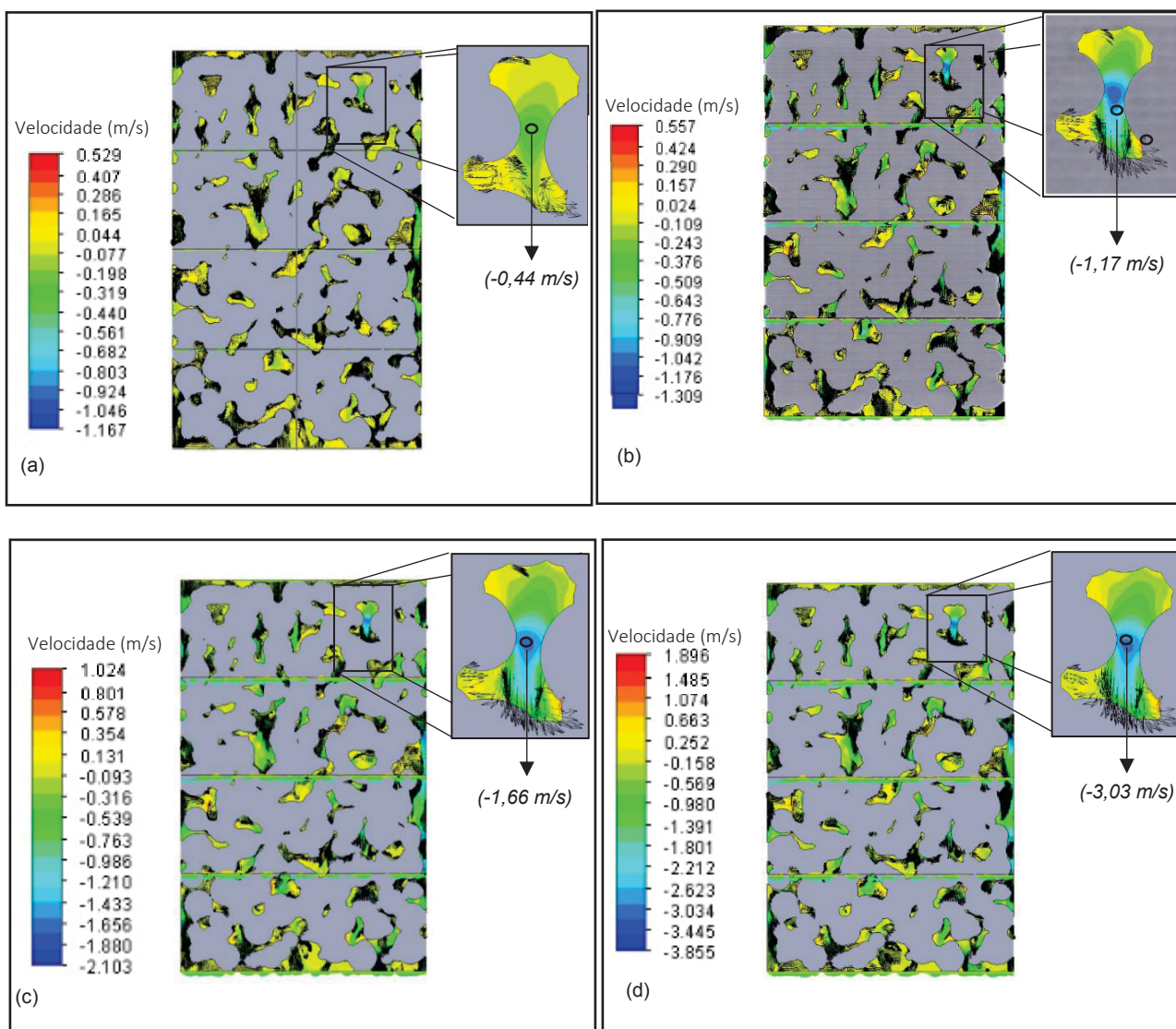
6.2.2 Linhas de fluxo do escoamento: Modelo físico

O modelo numérico oferece informações sobre a distribuição de velocidade, - linhas de fluxo - para as porosidades ao longo do eixo da amostra, possibilitando a avaliação de parâmetros que quase nunca poderiam ser obtidos experimentalmente.

Para o melhor entendimento de como a heterogeneidade do meio poroso influencia o escoamento do fluido, na Figura 63 são apresentados a seção longitudinal do modelo geométrico, com um detalhamento de um poro específico, permitindo verificar a velocidade em seu interstício, para diferentes pressões. A simulação buscou situações com considerável amplitude, inicialmente com uma pressão de 489,30 Pa, retratando um baixo gradiente hidráulico, de 0,625 m/m, semelhante a uma lamina de água de 5 cm, ocasionalmente comparável a uma situação de chuva, e também com pressão aplicada de 14679,10 Pa, que retrata um comportamento de elevado gradiente hidráulico, de 18,75 m/m. Assim, as linhas de fluxo foram representadas para algumas das pressões ensaiadas: 489,30 Pa, 2.935,82 Pa,

4.893,03 Pa e 14.679,10 Pa, como pode ser visualizado nas Figuras 63a a 63d, respectivamente.

FIGURA 63 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA - SEÇÃO LONGITUDINAL DO MODELO FÍSICO COM LINHAS DE FLUXO E SUA RESPECTIVA LEGENDA: (A) PRESSÃO DE 489,30 Pa, (B) PRESSÃO DE 2.935,82 Pa, (C) PRESSÃO DE 4.893,03 Pa, (D) PRESSÃO 14.679,10 Pa



Nestas ilustrações, as setas e a coloração interna dos poros, indicam a direção e a velocidade do fluxo, respectivamente. Nota-se que uma mudança abrupta na direção do fluxo ocorre quando o fluido impacta contra o fase sólida. Isso resulta em uma dissipação da velocidade do fluxo de fluido nos condutos com características de regime não linear, e com notável aumento da dissipação da energia cinética durante o escoamento à medida que a carga hidráulica aumenta, como pode ser observado nos interstícios dos poros em destaque, e da respectiva legenda, onde a

velocidade aumentou de 0,44 m/s para 3,03 m/s com um aumento de 489,30 Pa para 14.679,10 Pa, respectivamente.

A partir dos dados de fluxo, nota-se que a velocidade nos interstícios do meio poroso é maior do que a velocidade média, - definida pela razão entre a vazão final e a área da seção - confirmando o que Dupuit (1863) observou em seus experimentos, uma vez que a área da seção longitudinal disponível ao escoamento nos interstícios dos poros é efetivamente menor.

Na Tabela 28 pode ser observado que o escoamento no modelo geométrico e em um CP produzido laboratorialmente, ambos com porosidade total de 27%, possuem os valores de \sqrt{k} próximos, mas com escoamentos, d/\sqrt{k} , distintos. Ou seja, é possível que o escoamento em meios porosos seja semelhante na zona linear, mas diferente quando a heterogeneidade presente no meio poroso, d , passa a exercer influência, reforçando que a porosidade, e o \sqrt{k} , são parâmetros não determinantes no escoamento em meio porosos.

TABELA 28 – PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA MEIOS POROSOS: NÚMÉRICO E EXPERIMENTAL

Referência	Porosidade	\sqrt{k} (E^{-05})	d/\sqrt{k}
Flow Simulation (dados numéricos)	27%	4,8	0,26
CP42HC(30) (dados experimentais)	27%	4,9	1,39

Está comparação apenas reforça a importância das corretas definições na caracterização do escoamento, e não busca extrair parâmetros hidráulicos, obtidos numericamente, para os mais variados gradientes hidráulicos, de modo que reflita na caracterização do CP produzido experimentalmente. Ressalta-se que, nesta abordagem, o modelo geométrico utilizado é distinto do CP do traço CP42HC(30).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÃO GERAL

A principal contribuição proveniente desta tese de doutorado foi o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação e interpretação do comportamento hidráulico do concreto permeável. Para isso, os regimes de escoamento do fluido foram devidamente classificados e foram definidos parâmetros hidráulicos que auxiliam em sua caracterização, considerando a heterogeneidade do meio poroso.

7.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

- As propriedades do concreto permeável estão relacionadas aos diferentes tipos e níveis de compactação (haste e vibração), na utilização de agregados de diferentes dimensões e combinações granulométricas (uniforme e continua) e nas diferentes relações P/Ag e nas relações a/c.
- A consistência do concreto permeável está intrinsecamente relacionada com a faixa granulométrica, a relação a/c e a relação P/Ag. Este estudo, considerando uma metodologia adaptada, contribui para projetos de dosagem.
- A aplicação do Método do Ultrassom merece atenção especial para caracterização do concreto permeável, permitindo, dentro de determinados limites de porosidade, prever suas propriedades. Observou-se que a onda ultrassônica se propaga por caminhos preferenciais, influenciando significativamente na definição da VPU.
- Qualquer avaliação competente do fluxo através de concretos permeáveis deve ser realizada em uma estrutura não-Darciana. Isso pode ser alcançado aplicando a lei de Forchheimer. A insistência no uso da lei de Darcy pode levar a uma determinação inadequada dos parâmetros de permeabilidade, o que pode comprometer projetos de engenharia baseados em concretos permeáveis.
- A análise de acordo com a formulação proposta por Lofrano *et al.* (2020), em termo do número de Reynolds, $Re_{\sqrt{k}}$, e do fator de resistência, $f_{\sqrt{k}}$, para meios porosos, possibilitou de forma clara e inequívoca a avaliação dos regimes de fluxo, sendo uma ferramenta de projeto útil. Esta abordagem também tem a vantagem de

distinguir a parte da resistência ao fluxo imposta pelas características do fluido e do fluxo ($1/Re_{\sqrt{k}}$) daquela devido à conformação geométrica do meio poroso (d/\sqrt{k}).

- O regime de escoamento foi definido como não linear, mesmo para carga hidráulica relativamente baixa, ainda não atingindo um limite que se pode afirmar como turbulento. O coeficiente de permeabilidade intrínseco, k , não se deixa afetar pelo fluido Newtoniano ou pelas características de fluxo registradas, como taxa de fluxo e temperatura. Seu uso (ou, mais precisamente, de sua raiz quadrada, \sqrt{k}) sobre o tradicional, coeficiente de permeabilidade Darciano, K , é preferível.
- O parâmetro hidráulico d/\sqrt{k} foi encontrado para cada amostra de concreto permeável. Foi demonstrado que este parâmetro é uma espécie de assinatura do comportamento hidráulico imposto por um determinado meio poroso. Também apresenta uma correlação maior com a porosidade do que a consideração dos parâmetros \sqrt{k} e d individualmente. Até que protocolos melhores para determinar a porosidade efetiva sejam definidos, usar porosidade total para prever a permeabilidade parece mais simples e menos sujeito a erros. Ainda assim, melhores descrições do espaço poroso são necessárias para articular modelos mais precisos para prever o escoamento de concretos permeáveis.
- Uma interpretação física mais profunda de d foi alcançada de tal forma que estudar o escoamento através de concretos permeáveis contribui para o entendimento geral do escoamento através de meios porosos.
- A porosidade do concreto permeável diminui com o aumento da relação P/Ag ; entretanto, a dispersão dos valores de P_t e P_e também parecem depender da relação P/Ag . Isso traz *insights* sobre como a aleatoriedade envolvida no processo de aumento da pasta de cimento afeta a natureza e a disponibilidade de caminhos de fluxo. Também contribui para a compreensão da heterogeneidade (do ponto de vista hidráulico) entre espécimes de uma mesma mistura. Por mais que se tenha um controle tecnológico sobre a distribuição de partículas, não tem controle sobre a distribuição do espaço poroso.
- O estudo demonstra que é possível utilizar simulações numéricas computacionais para obter dados referentes ao escoamento em concreto permeável, em reduzido tempo, esforços e custos necessários. Nota-se que o ajuste da Lei de Forchheimer foi bem sucedido neste caso, indicando que a simulação computacional apresentou o comportamento não linear especialmente para um gradiente hidráulico

da ordem de 20 m/m. A simulação computacional oferece informações sobre a distribuição de velocidade relacionados ao perfil do meio poroso ao longo do eixo da amostra de CP, possibilitando a avaliação de parâmetros que quase nunca poderia ser obtido experimentalmente, como a verificação de que a velocidade real nos interstícios do meio poroso é maior do que a obtida macroscopicamente.

7.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

Uma tese tem por função expandir as fronteiras do conhecimento, e o dever de estimular novas perguntas, a fim de que novos estudos promovam o desenvolvimento científico. Desse modo, algumas linhas de pesquisa são propostas nos tópicos abaixo:

- Elaborar um modelo geométrico de concreto permeável a partir de uma impressora 3D, considerando uma distribuição espacial uniforme e conhecida, semelhante ao CP produzido laboratorialmente, buscando caracterizar o escoamento com foco em uma calibração computacional na simulação de fluxo do fluido, para diferentes rugosidades do material, e consequentemente na determinação do fator de atrito. Desse modo, a finalidade é refinar o modelo numérico computacional, com considerações que garantam maior precisão nos resultados.
- Investigar as propriedades hidráulicas do concreto permeável como elemento pré-moldado, correlacionando com CPs produzidos laboratorialmente, de modo que projetos de drenagem possam ser desenvolvidos com bases nas delimitações realizadas neste estudo.
- Promover campanhas experimentais *in loco*, avaliando a taxa de infiltração do conjunto, concreto permeável e solo, e correlacionar com dados laboratoriais, considerando diferentes tipos de solo, e analisar, criteriosamente, a possibilidade de padronizar instruções normativas para avaliar a permeabilidade em pavimentos.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. **Bulletin 1**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 1918.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**, BT-106, 7.ed, 28p., São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR NM 52**: Agregado Miúdo - Determinação de massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 53**: Agregado Graúdo - Determinação de massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211**: Agregado para Concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15805**: Pisos elevados de placas de concreto - Requisitos e procedimentos, Rio de Janeiro, 2015

_____. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos, Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7162**: Solo-Ensaio de Compactação, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland- Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.

AKAND, L.; YANG, M.; GAO, Z. Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. **Construction and Building Materials**, v.114, n. C, p. 547–555, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), 2002. **Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete**. ACI 211. Report number: ACI 211.3R-02.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), 2010. **Report on Pervious Concrete**. ACI Committee 522. Report number: ACI 522R-10.

AMINI, K.; WANG, X.; DELATTE, N. Statistical Modeling of Hydraulic and Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Nondestructive Tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 6, p. 1-8, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688 / C1688M**, Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2014.

_____. **ASTM C1701 / C1701M**, Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

_____. **ASTM C1747 / C1747M**, Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

_____. **ASTM C597**, Pulse velocity through concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989.

_____. **ASTM C39/C39M**, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM C496 / C496M**, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2011.

_____. **ASTM C1754 / C1754M**, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

_____. **ASTM C192 / C192M**, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

_____. **ASTM D3385**, Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

_____. **ASTM E1316-14**, Standard Terminology for Non-Destructive Examinations, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASHLEY, E. Using Pervious Concrete to Achieve LEED Points. **Concrete Infocus**. National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD, p. 1-6, 2008.

AZHARI, H. **Basics of biomedical ultrasound for engineers**. Hoboken, N.J.:Wiley-IEEE Press; 2010.

BARNHOUSE, P. W.; SRUBAR, W.V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 89-97, 2016.

BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media**, American Elsevier Publishing Company, New York, 1972.

BHUTTA, M. A. R.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUSSIN, M. W.; TAHIR, M. B. M.; MIRZA, J. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243 -1248, 2013.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p.102 -110, 2015.

BOGAS, J. A.; GOMES, M.G.; GOMES, A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. **Ultrasonics**, v. 53 p. 962-972, 2013.

BRAKENRIDGE, G. R. "Global Active Archive of Large Flood Events", 2010. Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado, Disponível em: <<http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

BRATTEBO, B.O.; BOOTH, D.B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. **Water Research**, v. 37, n. 18, p. 4369 - 4376, 2003.

BROWN, R.; BORST, M. Evaluation of Surface Infiltration Testing Procedures in Permeable Pavement Systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 140, n. 3, p. 1-12, 2014.

BENOUIS, A.; A. GRINI, A. Estimation of concrete's porosity by ultrasounds. **Physics Procedia**, v. 21, p. 53 – 58, 2011.

BORHAN, T. M; AL KARAWI, R. J. Experimental investigations on polymer modified pervious concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v.12 p. 1-7, 2020.

CAHILL, T. H; ADAMS, M; MARM, C. Porous asphalt: the right choice of porous pavements. **Hot Mix Asphalt Technology**, v. 9, n.5, p. 26-40, 2003.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações-Fundamentos**, v. 1, 234p, Rio de Janeiro, 1988.

CARRIÓN, A.; GENOVÉS, V.; GOSÁLBEZ, J.; MIRALLES, R.; PAYÁ, J. Ultrasonic signal modality: A novel approach for concrete damage evaluation. **Cement and Concrete Research**, v. 101, p. 25-32, 2017.

CAVALARO, S. H. P.; BLANCO, A.; PIERALISI, R. Holistic modelling approach for special concrete: from fresh- to hardened-state. **RILEM Technical Letters**, v. 3. p. 84 - 90, 2018.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627- 637, 2016a.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262 - 274, 2016b.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity. **Materials and Structures**, v. 49, p. 5255 - 5271, 2016c.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Investigations on Pervious Concrete Properties Using Ultrasonic Wave Applications. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 45, n.5, p.1736-1749, 2017.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pore Structure Characterization of Pervious Concrete Using X-Ray Microcomputed Tomography. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n.6, p.1-11, 2018.

CHEN, X.; WANG, H.; NAJM, H.; VENKITEELA, G.; HENCKEN, J. Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. **Journal of Cleaner Production**, v. 207 p. 789-800, 2019.

CHINDAPRASIRT, P.; HATANAKA, S.; CHAREERAT, T.; MISHIMA, N.; YUASA, Y. Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 894 - 901, 2008.

COOLEY, A. J. **Permeability of Superpave Mixtures: Evaluation of Field Permeameters**. NCAT Report 99-1, 1999.

CORE, R. (2015). **Team**. R: a language and environment for statistical computing.

COSIC, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69 - 76, 2015.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, 2018.

CROUCH, L. K.; SMITH, N.; WALKER, A. C.; DUNN, T. R.; SPARKMAN, A. Determining pervious PCC permeability with a simple triaxial flexible-wall constant head permeameter. In: Concrete Technology Forum: **Focus on Pervious Concrete**, Nashville, May 24–25, 2006, Conference proceedings, publication 2PCTF06, National Ready Mixed Concrete Association.

CUI, X.; ZHANG, J.; HUANG, D.; LIU, Z.; HOU, F.; CUI, S.; ZHANG, L.; WANG, Z. Experimental Study on the Relationship between Permeability and Strength of Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 1 - 9, 2017.

DAI, Z.; LI, H.; ZHAO, W.; WANG, X.; WANG, H.; ZHOU, H.; YANG, B. Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. **Construction and Building Materials**, v.233, p.117-178, 2020.

DAN, H. C.; HE, L. H.; XU, B. Experimental Investigation on Non-Darcian Flow in Unbound Graded Aggregate Material of Highway Pavement. **Transp. Porous Med**, v.112, p.189 - 206, 2016.

DEO, O.; SUMANASOORIYA, M.; NEITHALATH, N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling, **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 7, p. 741-751, 2010.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 643 - 651, 2019.

DUPUIT, J. Études théorique et pratiques sur le mouvement des eaux dan les canaux découverts et a travers led terraines perméables. 2° ed. Paris: Dunod, 304p, 1863.

FERGUSON, B. K. **Porous pavements**, Boca Raton: CRC Press, London, 577p, 2005.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**, 4. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.

FORCHHEIMER, P. Wasserbewegung durch Boden. **Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure**, v.45, n.49, p. 1736 – 1741, 1901a.

FORCHHEIMER, P. Wasserbewegung durch Boden. **Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure**, v.45, n.49, p. 1781 – 1788, 1901b.

FRANCIS, A. M. Early Concrete Buildings in Britain. **Concrete and Constructional Engineering**, London, v. 60, n. 2, p. 73-75, 1965.

GAEDICKE, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers, **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 151-160, 2013.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 494 - 503, 2014.

GAEDICKE, C.; TORRES, A.; HUYNH, C.T.; MARINES, A. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 271- 278, 2016.

GARCIA, E. S. H.; THIVES, L. P.; GHISI, E.; ANTUNES, L. N. Analysis of permeability reduction in drainage asphalt mixtures due to decrease in void volume. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1 – 20, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119292>.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 7, n. 3, p. 183 –191, 1995a.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Development of No-Fines Concrete Pavement Applications,” **Journal of Transportation Engineering**, v.126, n. 3, p. 283-288, 1995b.

GROSTEIN, M. D. METRÓPOLE E EXPANSÃO URBANA a persistência de processos “insustentáveis”. **Rev. SÃO PAULO EM PERSPECTIVA**, v.15, n.1, p. 13-19, 2001.

GESOGLU, M.; GUNEYISI, E.; KHOSHNAW, G.; IPEK, S. Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 19-24, 2014.

GODINHO, J.P.; DE SOUZA JUNIOR, T.F.; MEDEIROS, M.H.F.; A SILVA, M. S. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. **IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL**, v.13, n.2, p. 222 – 247, 2020.

HAGER, A. S. **Sustainable Design of Pervious Concrete Pavements**. PhD Dissertation, University of Colorado Denver, Department of Civil Engineering, Denver, CO, 2009.

HARRIS, M. China's sponge cities: soaking up water to reduce flood risks. **THE GUARDIAN**, 2015. Disponível em: <www.theguardian.com/sustainable-business/2015/oct/01/china-sponge-cities-los-angeles-water-urban-design-drought-floods-urbanisation-rooftop-gardens>. Acesso em: 13 mai de 2018.

HATANAKA, S., KAMALOVA, Z., HARADA, M. Construction of a nonlinear permeability model of pervious concrete and drainage simulation of heavy rain in a residential area. **Results in Materials**, v.3, p. 1 - 6, 2019.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates. **Int. J. Pavement Eng.**, v 13, n 3, p. 197-208, 2012.

HERNANDEZ, M. G.; ANAYA, J. J.; SANCHEZ, T.; SEGURA, I. Porosity estimation of aged mortar using a micromechanical model. **Ultrasonics**, v.44, p. 1007 - 1011, 2006a.

HERNANDEZ, M.G.; ANAYA, J. J.; ULLATE, L. G.; CEGARRA, M.; T. SANCHEZ, T. Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 617- 624, 2006b.

HOOK, J. R. An Introduction to Porosity. **Petrophysics**, v. 44, n. 3, p. 205 - 212, 2003.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 818 - 823, 2010.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524- 529, 2014.

IKPONG, A. A. The relationship between the strength and nondestructive parameters of rice husk ash concrete, **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 387- 398, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **IBGE**, Censo demográfico 1940/2010. População residente e presente. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=10&op=2&vcodigo=CD90&t=populacao-presente-residente>>. Acesso em: 17 mai. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **IBGE**, Censo demográfico 1940/2010. População residente e presente. Disponível em: <

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=resultados>. Acesso em: 18 jul. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICO, **IBGE**. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2013. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2245#resultado>>. Acesso em: 06 jan. 2019.

JING, Y.; GUOLIANG, J. Experimental Studies on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2003.

JIANG, X.; XIAO, L. Study of the Permeability Coefficient of Pervious Concrete with Various Aggregate Grades. **Materials Science and Engineering**, v. 562, p. 1 - 6, 2019.

KEVERN, J. T. **Advancements in pervious concrete technology** (2008). *Retrospective Theses and Dissertations*. 93. <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/93>

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T. Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability. **Journal of ASTM International**, v. 5, n.2, p. 1-12, 2008.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. The effect of curing regime on pervious concrete abrasion resistance. **J. Test. Evalu.** v. 37, n. 4, 2009.

KEVERN, J. T.; NOWASELL, Q. C. Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 229 - 235, 2018.

KHANKHAJE, E.; SALIM, M. R.; MIRZA, J.; HUSSIN, M. W., RAFIEIZONOOZ, M. Properties of sustainable lightweight pervious concrete containing oil palm kernel shell as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 1054 - 1065, 2016.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v.193, p. 221- 233, 2017.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Defining clogging potential for permeable concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 220, p. 44 - 53, 2018.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. **Applied Acoustics**, v. 71, p. 607- 615, 2010.

KIM, Y. J.; GADDAFI, A.; YOSHITAKE, I. Permeable concrete mixed with various admixtures. **Materials and Design**, v.100, p. 110 -119, 2016.

KLEMENC, S. E. Pretty and Pervious: Decorative Options for Pervious Concrete, **CONCRETE DECOR**, 2010. Disponível em:

<<http://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-10-no-2-februarymarch-2010/decorative-options-for-pervious-concrete/#prettyPhoto>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

KNIGHT, S. What would an entirely flood-proof city look like? **THE GUARDIAN**, 2017. Disponível em: <www.theguardian.com/cities/2017/sep/25/what-flood-proof-city-china-dhaka-houston>. Acesso em: 12 mai. 2018.

KRUMBEIN, W. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 11, p. 64-72, 1941.

KUO, W. T.; LIU, C. C.; SU, D. S. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.37, p. 328 - 335, 2013.

LAFHAJ, Z.; GOUYEGOU, M.; DJERBI, A.; KACZMAREK, M. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p.625 - 633, 2006.

LEDERLE, R.; SHEPARD, T.; DE LA VEGA, V, M. Comparison of methods for measuring infiltration rate of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 1 - 9, 2020.

LI, H.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J. T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management** , v. 118, p.144 -152, 2013.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. **Journal of Environmental Management**, v.193, p. 221-233, 2010.

LIAN, C.; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 4294 - 4298, 2011.

LIM, E.; TWAN, K. H.; FWA, T. F. Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for use in pavement. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 9, p. 1565 - 1575, 2013.

LIU, R.; LIU, H.; SHA, F.; YANG, H.; ZHANG, Q.; SHI, S.; ZHENG, Z. Investigation of the Porosity Distribution, Permeability, and Mechanical Performance of Pervious Concretes. **Processes**, v.6, n. 78, 2018.

LIU, T.; WANG, Z.; ZOU, D.; ZHOU, A.; DU, J. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. **Cement and Concrete Research**, v.122, p.72–82, 2019.

LOFRANO, F. C.; MORITA, D. M.; KUROKAWA, F. A.; DE SOUZA, P. A. New General Maximum Entropy Model for Flow Through Porous Media. **Transport in Porous Media**, v.131, p. 681–703, 2020.

LOFRANO, F. C. **Escoamento em meios porosos: um modelo analítico não darciano baseado no princípio da entropia máxima**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/T.3.2019.tde-08022019-095113.

LUCK, J. D.; WORKMAN, S. R.; HIGGINS, S. F.; COYNE, M. S. Hydrologic properties of pervious concrete. **Trans. ASABE**, v. 49, n. 6, p.1807-1813, 2006.

LUND, M. S. M.; HANSEN, K. K.; HERTZ, K. D. (2014). **Experimental Study of Properties of Pervious Concrete used for Bridge Superstructure**. In Proceedings of the 12th International Symposium on Concrete Roads European Concrete Paving Association.

MAGUESVARI, U. M.; NARASIMHA, V. L. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 198-207, 2013.

MALHOTRA, V. M. A Low-Cost Concrete Building. **Engineering News Record**, p. 62- 63, 1969.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2^o edition. New York: CRC Press, 2004.

MARTINS FILHO, S.T.; BOSQUESI, E.M.; FABRO, J.R.; PIERALISI, R. Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing. **IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL**, v.13, p. 483 – 500, 2020.

MEININGER, R. C. No-Fines Pervious Concrete for Paving. **Concrete International**, v.10, p. 20 - 27, 1988.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete. **Environ. Eng. Sci.**, v. 23, n. 6, p. 960 - 969, 2006.

MORETTI, L.; DI MASCIO, P.; FUSCO, C. Review: Porous Concrete for Pedestrian Pavements. **Water**, v. 11, p. 1 - 13, 2019.

NAIK, T.; MALHOTRA, V.; POPOVICS, J. **The ultrasonic pulse velocity method, handbook on nondestructive testing of concrete**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; p. 182 - 200, 2003.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA). **Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete**. Silver Spring, 17 pp, 2004.

NAFFA, S. O.; GOUEYGOU, M.; PIWAKOWSKI, B.; BODIN, F.B. Detection of chemical damage in concrete using ultrasound. **Ultrasonics**, v. 40, p. 247-251, 2004.

NEITHALATH N. **Development and characterization of acoustically eficiente cementitious materials**. 269p. PhD thesis, Purdue University, 2004.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, p. 802- 813, 2010.

NEITHALATH N.; WEISS, J.; OLEK, J. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 2074 – 2085, 2006.

NEITHALATH, N.; DEO, O. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 4181- 4189, 2011.

NELSON, P. M.; PHILLIPS, S. **Designing Porous Road Surfaces to Reduce Traffic Noise**. Transportation Research Laboratory Annual Review, TRL, Crow Thorne, England, 58 pp, 1994.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; BARAUD, F.; LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. **Construction and Building Materials**, v. 135, p.137-150, 2017.

NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271 - 282, 2014.

NICHOLS, P. W. B.; LUCKE, T.; CARSTEN DIERKES, C. Comparing Two Methods of Determining Infiltration Rates of Permeable Interlocking Concrete Pavers. **Water**, v. 6, p. 2353 - 2366, 2014.

NUTTING, P. G. Physical analysis of oil sands. **Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists**, v. 14, n.10, p. 1337 – 1349, 1930.

OBLA, K.H. Pervious concrete- An overview. **The Indian Concrete Journal**, v. 84, n. 8, p. 9 -18, 2010.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas - Princípios e aplicações em processamento cerâmico**, Fazenda Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000), pp. 224, ISBN 85-86425-15-X.

ONG, G. P. O.; JAGADEESH, A.; SU, Y. M. Effect of pore network characteristics on non-Darcy permeability of pervious concrete mixture. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 1 – 10, 2020.

OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete —the possibility of NDE. **Ultrasonics**, v. 38, p. 546 - 552, 2000.

OSPINA, C. M. M.; ERAZO, C. H. B. **Resistencia mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según el tipo de granulometría**. Medellín, 2007.

PARK, S. B.; TIA, M. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 177-184, 2004.

PIERALISI, R. **Characterization and modelling of pervious concrete**. Universitat Politècnica de Catalunya Departament d'Enginyeria de la Construcció, Barcelona, March, 2016.

PIERALISI, R.; CAVALARO, S.H.P.; AGUADO, A. Discrete element modelling of the fresh state behavior of pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 90, p. 6 -18, 2016.

PIERALISI, R.; CAVALARO, S.H.P.; AGUADO, A. Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 149 -160, 2017.

PRANDTL, L. Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Intern. Math. Kongr. III, 1904, Heidelberg, **Anais**... 1905. p. 484-491.

QIN, Y.; YANG, H.; DENG, Z.; HE, J. Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods, **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, p. 1 - 6, 2015.

RANIERI, V.; COLONNA, P.; SANSALONE, J. J.; SCIDDURLO, A. Measurement of Hydraulic Conductivity in Porous Mixes. **Transportation Research Record**, v. 2295, n.1, p. 1-10, 2012.

RIDENGAOQIER, E.; FUJIKI, R.; HATANAKA, S.; MISHIMA, N. Study on estimation of void ratio of porous concrete using ultrasonic wave velocity, **J. Struct. Constr. Eng.**, v. 83, p. 943–95, 2018

RIDENGAOQIER, E.; HATANAKA, S. Prediction of porosity of pervious concrete based on its dynamic elastic modulus. **Results in Materials**, v. 10, p. 1-12, 2021.

RIVERS IN CRISIS. Mapping dual threats to water security for biodiversity and humans. Disponível em: <<http://www.riverthreat.net/data.html>>. Acesso em: 21 fev. 2018.

RIZVI, R.; TIGHE, S. L.; HENDERSON, V.; NORRIS, J. **Laboratory sample preparation techniques for pervious concrete**. 88th Annu Transpor Res Board Meet, DC, 16p, 2009.

RYSHKEVITCH, R. Compression strength of porous sintered alumina and zirconia. **Journal American Ceramic Society**, v. 36, n. 2, p. 65-68, 1953.

SABNIS G.M. **Green building with concrete**. Sustainable design and construction, 1st Ed. Boca Raton, 320p, 2012.

SANDOVAL, G. F. B.; GALO BARDES, I.; TEIXEIRA, R. S.; TORALLES, B. M. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, p. 317– 328, 2017.

SANDOVAL, G. F. B.; GALO BARDES, I.; CAMPOS, A.; TORALLES, B. M. Assessing the phenomenon of clogging of pervious concrete (Pc): Experimental test and model proposition. **Journal of Building Engineering**, v.29, p.1 - 11, 2020.

SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 33–39, 2013.

SHANG, H.; SUN, Z. PAHs (naphthalene) removal from stormwater runoff by organoclay amended pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 200, p.170 -180, 2019.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. National Concrete Pavement Technology Center, 83p, 2006.

SHABALALA, A. N.; EKOLUA, S. O.; DIOPB, S.; SOLOMONA, F. Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage–column study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 323, p. 641–653, 2017.

SINDHU, P. K.; RAJAGOPAL. D. Experimental Investigation on Maximum Strength of Pervious Concrete Using Different Size of Aggregates. **International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology**, v. 2, n.10, 2015.

SOLÍS-CARCAÑO, R.; MORENO, E. Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 6, p.1225-1231, 2008.

SONEBIA, M.; BASSUONIB, M.; YAHIA, A. Pervious Concrete: Mix Design, Properties and Applications. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 109 -115, 2016.

SRIRAVINDRARAJAH, R.; WANG, N. D. H.; ERVIN, L. J. W. Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 6, n. 4, p. 239 - 246, 2012.

SUMANASOORIYA, M. S.; NEITHALATH, N. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 778 - 787, 2011.

SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O.; REHDER, B.; NEITHALATH, N. A review of materials science-based models for mixture design and permeability prediction of

pervious concretes, **Int. J. Materials and Structural Integrity**, v. 9, n. 1-3, p. 108 - 130, 2015.

SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties, **Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete**, Nashville, TN, May 24-25, 2006.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. Technical report, EB302.02. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 32p, 2004.

TIJANI, M. A.; AJAGBE, W. O.; GANIYU, A. A.; AGBEDE, O. A. Effect of aggregate type on properties of pervious concrete. **Journal of Modern Technology and Engineering**, v. 4, n. 1, p. 37-46, 2019.

THO-IN, T.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Pervious highcalcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 366 - 371, 2012.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850 - 859, 2015.

TRTNIK, G.; KAVCIC, F.; TURK, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. **Ultrasonics**, v. 49, p. 53-60, 2009.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Programa de drenagem sustentável: apoio ao desenvolvimento do manejo das águas pluviais urbanas** – Versão 2.0. Brasília: Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, C. E. M.; CAMPANA, N. Estimativa da área impermeável de macrobacias urbanas. **Caderno de Recursos Hídricos**, v.12, n.2, p. 79-94, 1994.

TUMIDAJSKI, P. J.; LIN, B. On the validity of the KatzThompson equation for permeabilities in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 643 - 647, 1998.

VALÉRIO, V. C. A.; GANDARA, L. J.; ESPINO, D. J.; HERNANDEZ, J. R. Characterization of the Infiltration Capacity of Porous Concrete Pavements with Low Constant Head Permeability Tests. **Water**, v. 10, n. 4, p. 1-15, 2018.

VENKATARAMAN, P. R. M.; RAO, P. Darcian, Transitional, and Turbulent Flow through Porous Media, **J. Hydraul. Eng.**, v. 124, p. 840 - 846, 1998.

WANIELISTA, M.; CHOPRA, M.; SPENCE, J.; BALLOCK, C. **Hydraulic Performance Assessment of Pervious Concrete Pavements for Stormwater Management Credit**, Stormwater Management Academy, University of Central Florida, 81 p, 2007.

WANG, K.; SCHAEFER, V. R.; KEVERN, J. T.; SULEIMAN, M. T. **Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete**. NRMCA Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete, May 24-25, Nashville, TN, p.1-12, 2006.

WIMBERLY, J. D.; LEMING, M. L.; NUNEZ, R. A. **Evaluation of Mechanical and Hydrological Properties of High Voids Pervious Concrete**, North Carolina State Univ. Report, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2001.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 381 - 386, 2003.

YANG, Z.; MA, W.; SHEN, W.; ZHOU, M. The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci. Ed**, v. 23, n. 3, p. 391 - 394, 2008.

YAHIA, A.; KABAGIRE, D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 62, p. 38 - 46, 2014.

YEIH, W.; FU, T. C.; CHANG, J.J.; HUANG, R. Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 737 - 745, 2015.

YU, F.; SUN, D.; HU, M.; WANG, J. Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 687 - 702, 2019.

ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 585 - 591, 2013.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15 - 21, 2016.

ZINGG, T. **Beitrag zur schotteanalysis**. Diss.-Druckerei A.-O. Gebr. Leemann & Co., 107p., 1935.

ZHANG, J.; MA, G.; MING, R.; CUI, X.; LI, L.; XU, H. Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 468 - 478, 2018.

ZHENG, M.; CHEN, S.; WANG, B. Mix design method for permeable base of porous concrete. **Int J Pavement Res Technol**, v.5, n. 2, p.102 - 107, 2012.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 109, p.177-187, 2016.

ZHONG, R.; XU, M.; NETTO, R. V.; WILLE, K. Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 125, p.1158 - 1168, 2016.

ZHU, J.; KEE, S. H.; HAN, D.; TSAI, Y. T. Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 872 - 881, 2011.

ZOU, Y.; MALZBENDER, J. Development and optimization of porosity measurement techniques. **Ceramics International**, v. 42, n. 2, p. 2861–2870, 2016.

APÊNDICE 1 – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE: ABORDAGEM DARCIANA

A partir dos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de carga constante, em três cargas hidráulicas, - correspondente as alturas de 0,20, 0,30 e 0,40 m - foram obtidos os respectivos coeficientes de permeabilidade através da equação linear de Darcy, como pode ser observado na Tabela 29, complementados com os dados da vazão para cada um dos ensaios.

TABELA 29 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM DIFERENTES CARGAS HIDRÁULICAS

Traço	Altura de carga (m)	Vazão (l/s) (σ)	K (Darcy (mm/s) (σ))	Traço	Altura de carga (m)	Vazão (l/s) (σ)	K (Darcy (mm/s) (σ))
CP36VC(30)	0,40	0,244 (0,024)	9,56 (0,99)	CP45HU(30)	0,40	0,202 (0,016)	7,78 (0,70)
	0,30	0,239 (0,022)	11,19 (1,09)		0,30	0,182 (0,015)	8,31 (0,77)
	0,20	0,226 (0,029)	13,14 (1,85)		0,20	0,161 (0,013)	9,03 (0,85)
CP42VC(30)	0,40	0,212 (0,023)	8,19 (0,98)	CP55HU(26)	0,40	0,119 (0,005)	4,32 (0,22)
	0,30	0,207 (0,033)	9,58 (1,68)		0,30	0,106 (0,004)	4,51 (0,24)
	0,20	0,186 (0,028)	10,60 (1,79)		0,20	0,092 (0,004)	4,76 (0,32)
CP30HC(30)	0,20	0,242 (0,015)	14,12 (0,93)	CP55HU(30)	0,40	0,072 (0,021)	2,30 (0,89)
CP36HC(30)	0,40	0,221 (0,023)	8,57 (1,0)		0,30	0,064 (0,018)	2,37 (0,95)
	0,30	0,2 (0,021)	9,23 (1,07)		0,20	0,056 (0,016)	2,49 (1,04)
	0,20	0,176 (0,019)	10,01 (1,21)	CP55HU(34)	0,40	0,045 (0,011)	1,25 (0,49)
CP42HC(30)	0,40	0,213 (0,024)	8,22 (1,0)		0,30	0,041 (0,010)	1,28 (0,52)
	0,30	0,194 (0,024)	8,9 (1,22)		0,20	0,036 (0,008)	1,30 (0,53)
	0,20	0,171 (0,022)	9,67 (1,38)	CP65HU(30)	0,40	0,087 (0,018)	2,92 (0,76)
CP35HU(30)	0,40	0,229 (0,016)	8,92 (0,69)		0,30	0,078 (0,016)	3,07 (0,82)
	0,30	0,206 (0,016)	9,53 (0,84)		0,20	0,069 (0,014)	3,24 (0,90)
	0,20	0,180 (0,013)	10,26 (0,82)				

A fim de complementar a análise inicial desta tese, e permitir o melhor entendimento das conclusões derivativas deste estudo, pode ser observado na Figura

64 os gráficos para cada traço produzido, com seus respectivos CPs de diferentes porosidades, em função do coeficiente de permeabilidade.

FIGURA 64 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENE DE PERMEABILIDADE E ALTURA DE CARGA: ABORDAGEM DARCIANA

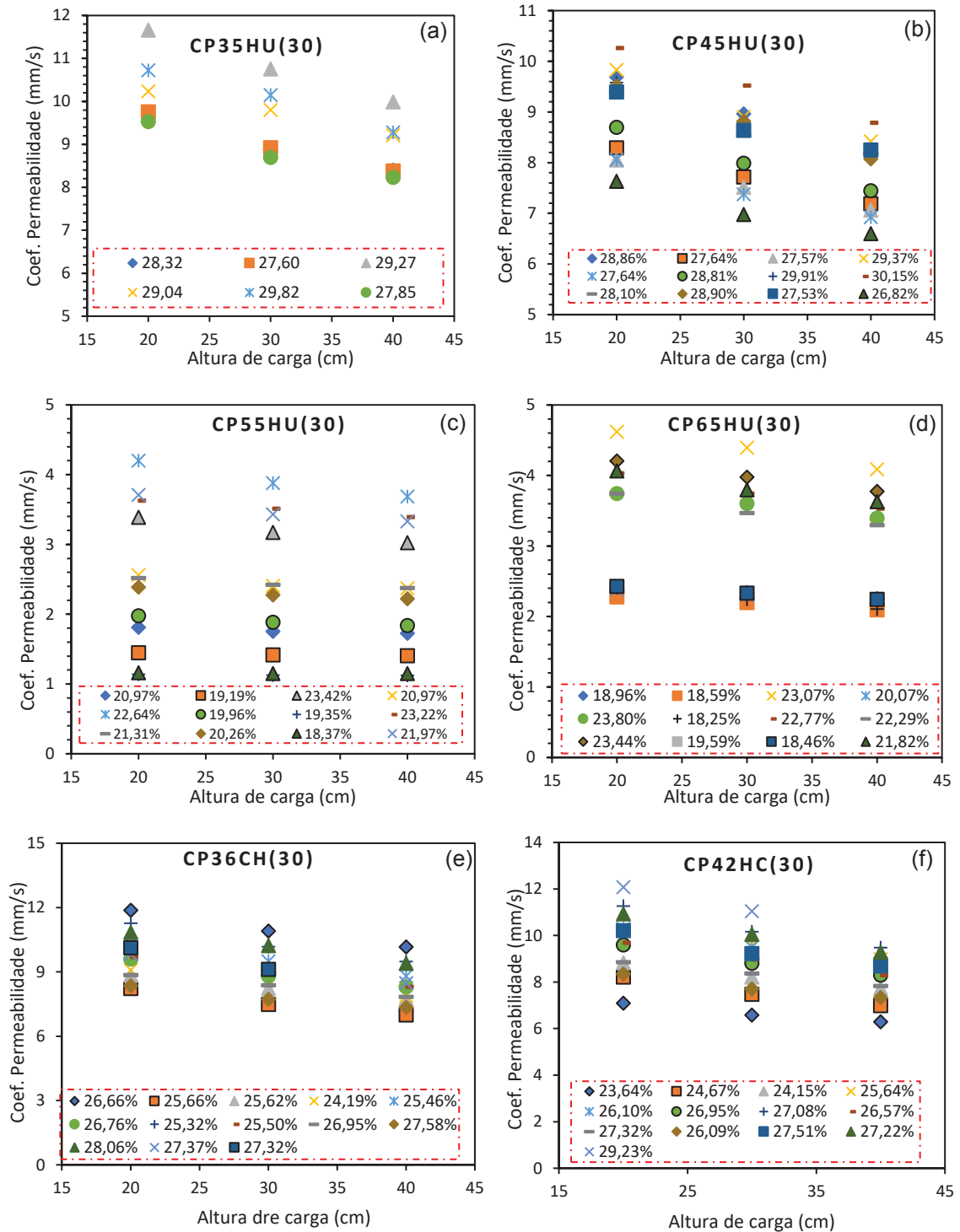
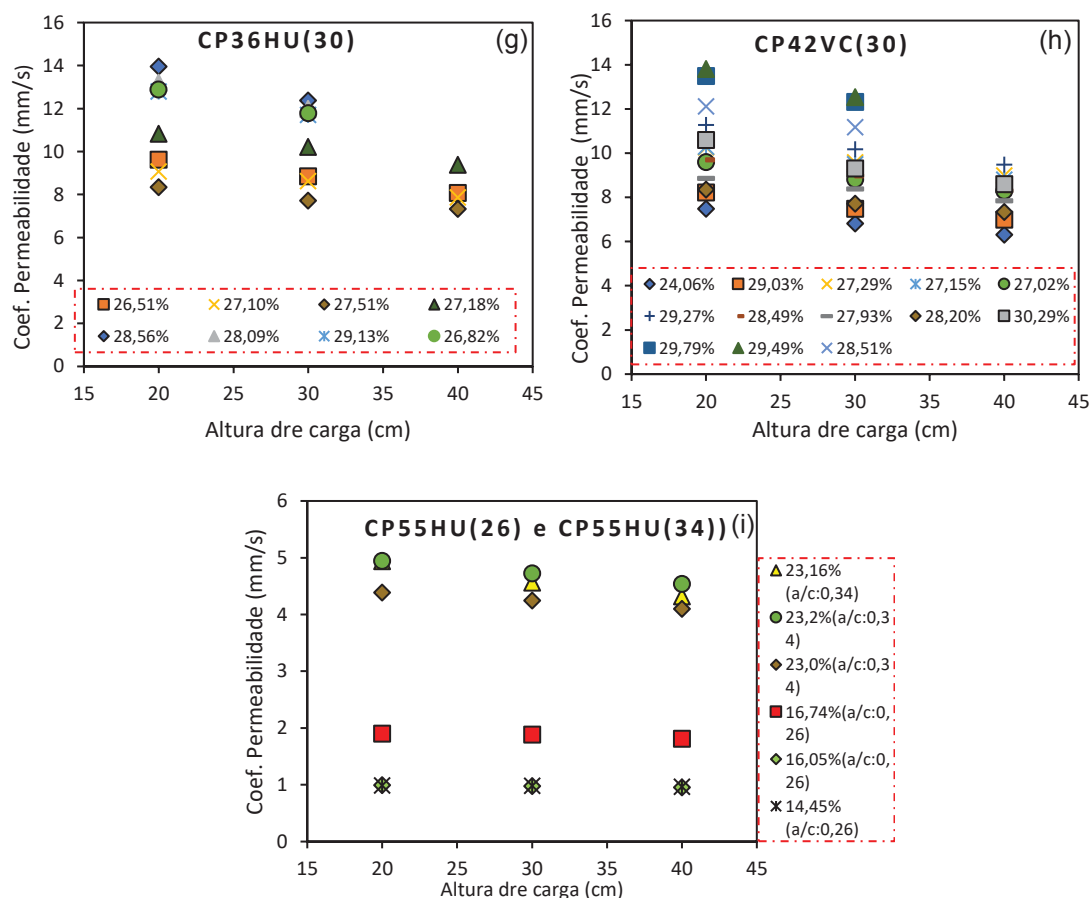


FIGURA 64 – CORRELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE E ALTURA DE CARGA: ABORDAGEM DARCIANA (continuação).



As diferentes porosidades para o mesmo traço refletem em diferenças nas vazões e nos respectivos coeficientes de permeabilidade, justificado pela heterogeneidade característica do concreto permeável, independentemente de ser proveniente da mesma dosagem. Desse modo, a interpretação não seria diferente caso todos CPs fossem organizados em um único gráfico. Nota-se que as variações no coeficiente de permeabilidade são decorrentes da inobservância das leis que regem o escoamento do fluido no meio poroso, representadas, neste caso, por equações lineares, da Lei de Darcy, onde o aumento da carga hidráulica reduziu, para todos CPs produzidos, o coeficiente de permeabilidade.

A partir dessa observação, foi possível extrapolar a caracterização erroneamente adotada sobre o comportamento hidráulico do concreto permeável. Destaca-se que foram realizados mais de 300 ensaios em permeâmetro de carga constante, o que permitiu, sem sombra de dúvidas, afirmar sobre a não linearidade do escoamento do concreto permeável e, a partir disso, direcionar a utilização de equações quadráticas para caracterizá-lo.

**APÊNDICE 2 – DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO (QIN *et al.* 2015):
ABORDAGEM NÃO DARCIANA**

Inicialmente, a investigação das características do escoamento no concreto permeável foi realizada com base em dados obtidos na literatura, ainda que escassas as pesquisas que determinaram a vazão de escoamento para diferentes cargas hidráulicas, em permeâmetro de carga constante, destaca-se o trabalho desenvolvido por Qin *et al.* (2015). A partir da aplicação da metodologia proposta nestes dados, foi possível constatar a viabilidade da abordagem para as campanhas experimentais assim elaboradas.

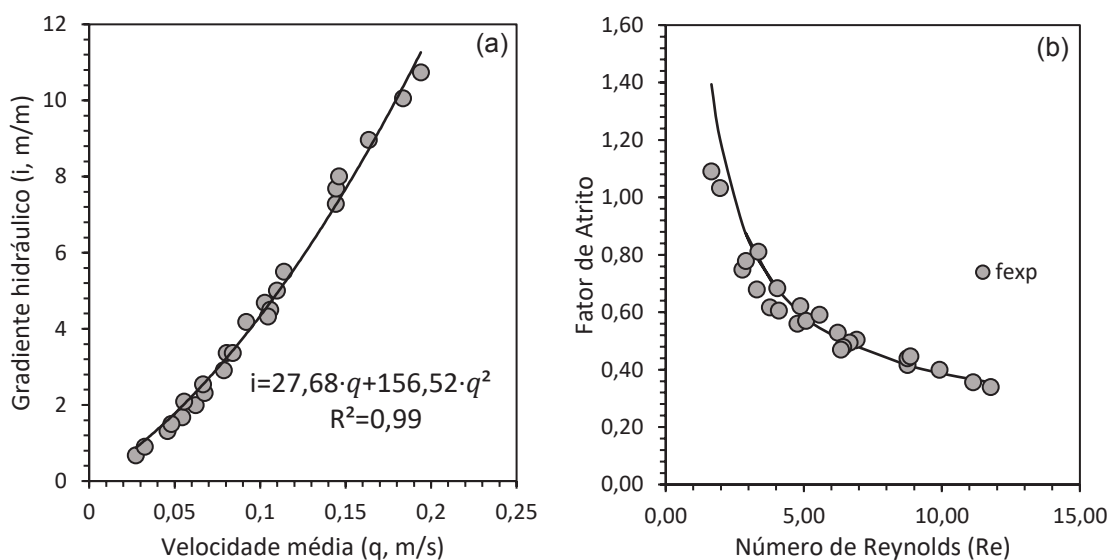
Na Tabela 30 podem ser observado os parâmetros hidráulicos (d , K e d/\sqrt{k}) para o traço QIN (1), - porosidade de 31,58% - além das características de escoamento representados através do número de Reynolds (Re) e fator de atrito.

TABELA 30 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (1)

Gradiente hidráulico (m/m)	Vazão (m³/s)	Vel. (m/s)	Re	f_{exp}	d (m)	K (m/s)	d/\sqrt{k}
6,83E-02	2,14E-04	2,73E-02	1,66E+00	1,09E+00	5,65 E-06	3, 61 E-02	9,31 E-02
9,10E-02	2,55E-04	3,24E-02	1,97E+00	1,03E+00			
1,32E-01	3,60E-04	4,58E-02	2,78E+00	7,48E-01			
1,68E-01	4,27E-04	5,43E-02	3,30E+00	6,79E-01			
1,50E-01	3,77E-04	4,79E-02	2,91E+00	7,78E-01			
2,00E-01	4,88E-04	6,22E-02	3,77E+00	6,17E-01			
2,32E-01	5,31E-04	6,76E-02	4,10E+00	6,05E-01			
2,09E-01	4,35E-04	5,54E-02	3,36E+00	8,11E-01			
2,55E-01	5,23E-04	6,66E-02	4,04E+00	6,84E-01			
2,91E-01	6,18E-04	7,87E-02	4,77E+00	5,60E-01			
3,37E-01	6,31E-04	8,03E-02	4,87E+00	6,21E-01			
3,37E-01	6,59E-04	8,39E-02	5,09E+00	5,70E-01			
4,19E-01	7,21E-04	9,18E-02	5,57E+00	5,92E-01			
5,51E-01	8,95E-04	1,14E-01	6,91E+00	5,05E-01			
5,01E-01	8,62E-04	1,10E-01	6,66E+00	4,95E-01			
4,69E-01	8,07E-04	1,03E-01	6,24E+00	5,29E-01			
4,51E-01	8,32E-04	1,06E-01	6,42E+00	4,78E-01			
4,32E-01	8,22E-04	1,05E-01	6,35E+00	4,70E-01			
7,28E-01	1,13E-03	1,44E-01	8,76E+00	4,16E-01			
7,69E-01	1,13E-03	1,44E-01	8,76E+00	4,40E-01			
8,01E-01	1,15E-03	1,46E-01	8,86E+00	4,47E-01			
8,97E-01	1,28E-03	1,64E-01	9,92E+00	3,99E-01			
1,01E+0	1,44E-03	1,83E-01	1,11E+01	3,56E-01			
1,07E+0	1,52E-03	1,94E-01	1,18E+01	3,40E-01			

Obtidos os dados da velocidade média do fluido, para seu respectivo gradiente hidráulico, modelou-se o comportamento não linear ilustrado pela Figura 65^a, e expresso pela equação potencial com bases em Forchheimer, com uma correlação (R^2) de 0,99. As constantes da equação expressas em $a = 27,68$ e $b = 156,52$, permitem obter o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada carga hidráulica ensaiada, como pode ser observado na Figura 65b, além dos parâmetros hidráulicos como observado na tabela supracitada.

FIGURA 65 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A), NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRITO (B): QIN (1)



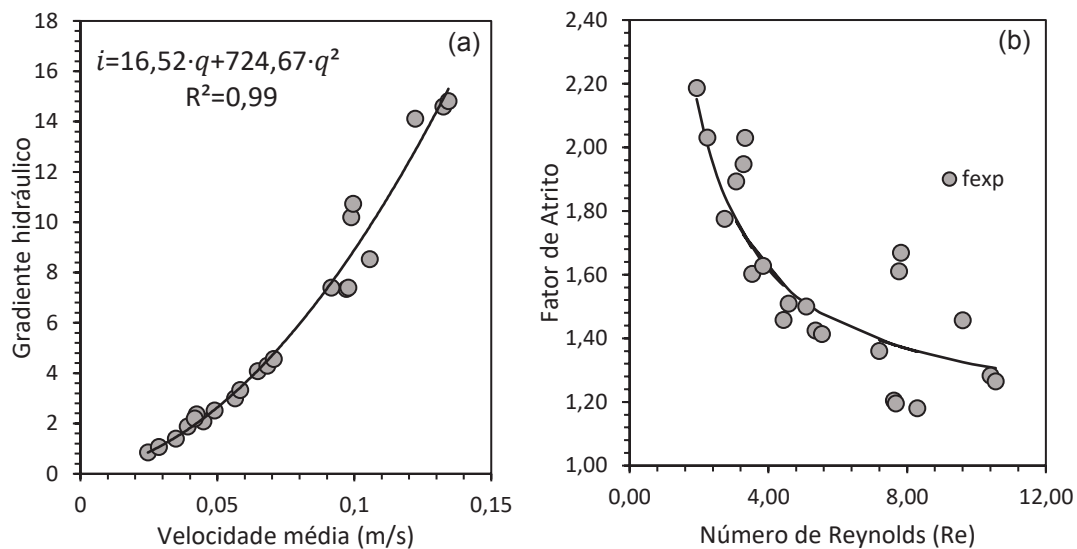
Na Tabela 31 podem ser observado os parâmetros hidráulicos (d , K e d/\sqrt{k}) para o traço QIN (2), - porosidade de 28,19% - além das características de escoamento representados através do número de Reynolds (Re) e fator de atrito.

TABELA 31 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (2)

<i>Gradiente hidráulico (m/m)</i>	<i>Vazão (m³/s)</i>	<i>Vel. (m/s)</i>	<i>Re</i>	<i>f_{exp}</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/√k</i>
8,59E-02	1,93E-04	2,46E-02	1,93E+00	2,19E+00	4,3864 E-05	6,0529 E-02	0,558
1,07E-01	2,24E-04	2,85E-02	2,24E+00	2,03E+00			
1,40E-01	2,73E-04	3,48E-02	2,73E+00	1,78E+00			
2,09E-01	3,52E-04	4,49E-02	3,52E+00	1,60E+00			
1,88E-01	3,07E-04	3,91E-02	3,07E+00	1,89E+00			
2,52E-01	3,84E-04	4,89E-02	3,84E+00	1,63E+00			
3,01E-01	4,43E-04	5,64E-02	4,43E+00	1,46E+00			
2,36E-01	3,33E-04	4,24E-02	3,33E+00	2,03E+00			
2,20E-01	3,28E-04	4,17E-02	3,28E+00	1,95E+00			
3,33E-01	4,58E-04	5,83E-02	4,58E+00	1,51E+00			
4,08E-01	5,09E-04	6,47E-02	5,09E+00	1,50E+00			
4,29E-01	5,35E-04	6,82E-02	5,35E+00	1,43E+00			
4,56E-01	5,54E-04	7,05E-02	5,54E+00	1,41E+00			
7,35E-01	7,62E-04	9,70E-02	7,62E+00	1,20E+00			
7,41E-01	7,67E-04	9,77E-02	7,68E+00	1,20E+00			
7,41E-01	7,19E-04	9,16E-02	7,20E+00	1,36E+00			
8,54E-01	8,29E-04	1,06E-01	8,29E+00	1,18E+00			
1,02E+00	7,76E-04	9,88E-02	7,76E+00	1,61E+00			
1,07E+00	7,82E-04	9,96E-02	7,82E+00	1,67E+00			
1,41E+00	9,60E-04	1,22E-01	9,60E+00	1,46E+00			
1,46E+00	1,04E-03	1,32E-01	1,04E+01	1,28E+00			
1,48E+00	1,06E-03	1,34E-01	1,06E+01	1,27E+00			

Obtidos os dados da velocidade média do fluido, para seu respectivo gradiente hidráulico, modelou-se o comportamento não linear ilustrado pela Figura 66a, e expresso pela equação potencial com bases em Forchheimer, com uma correlação (R^2) de 0,99. As constantes da equação expressas em $a = 16,52$ e $b = 724,67$, permitem obter o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada carga hidráulica ensaiada, como pode ser observado na Figura 66b, além dos parâmetros hidráulicos como observado na tabela supracitada.

FIGURA 66 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A) E NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRITO (B): QIN (2)



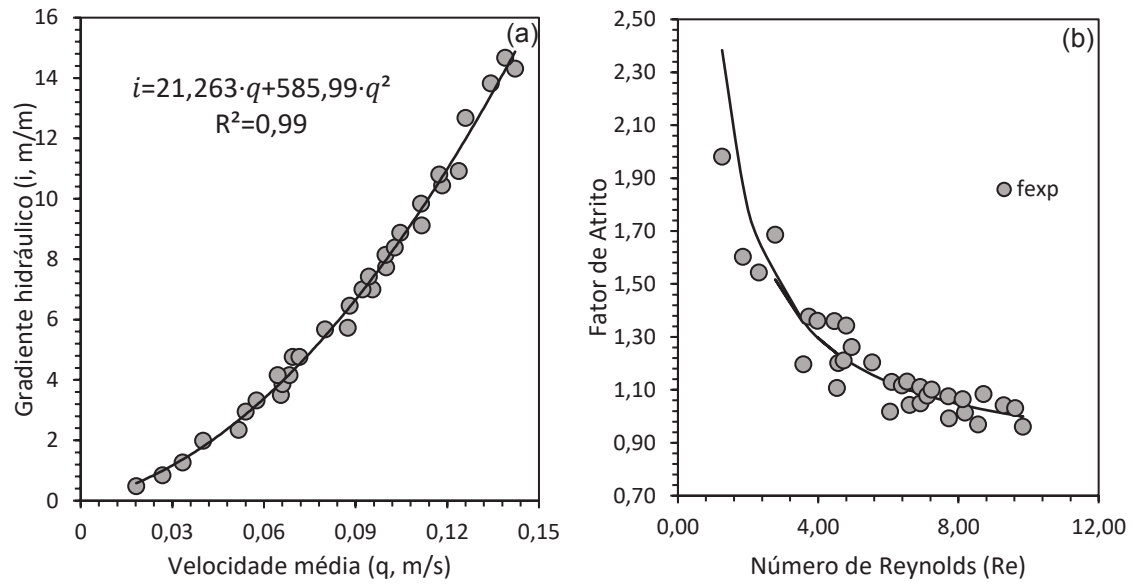
Na Tabela 32 podem ser observado os parâmetros hidráulicos (d , K e d/\sqrt{k}) para o traço QIN (3), - porosidade de 26,59% - além das características de escoamento representados através do número de Reynolds (Re) e fator de atrito.

TABELA 32 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (3)

<i>Gradiente hidráulico (m/m)</i>	<i>Vazão (m³/s)</i>	<i>Vel (m/s)</i>	<i>Re</i>	<i>f_{exp}</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/√k</i>
4,83E-02	1,43E-04	1,82E-02	1,26E+00	1,98E+00	2,75 E-5	4,703 E-2	0,398
8,45E-02	2,10E-04	2,68E-02	1,85E+00	1,60E+00			
1,27E-01	2,62E-04	3,34E-02	2,31E+00	1,54E+00			
2,35E-01	4,06E-04	5,17E-02	3,58E+00	1,20E+00			
1,99E-01	3,15E-04	4,01E-02	2,77E+00	1,69E+00			
2,96E-01	4,24E-04	5,40E-02	3,74E+00	1,38E+00			
3,50E-01	5,15E-04	6,56E-02	4,54E+00	1,11E+00			
3,32E-01	4,52E-04	5,76E-02	3,99E+00	1,36E+00			
3,86E-01	5,19E-04	6,61E-02	4,58E+00	1,20E+00			
4,17E-01	5,37E-04	6,84E-02	4,73E+00	1,21E+00			
4,17E-01	5,07E-04	6,45E-02	4,47E+00	1,36E+00			
4,77E-01	5,45E-04	6,94E-02	4,81E+00	1,34E+00			
4,77E-01	5,63E-04	7,17E-02	4,96E+00	1,26E+00			
5,68E-01	6,28E-04	8,00E-02	5,54E+00	1,20E+00			
5,74E-01	6,87E-04	8,75E-02	6,06E+00	1,02E+00			
6,46E-01	6,92E-04	8,81E-02	6,10E+00	1,13E+00			
7,00E-01	7,50E-04	9,55E-02	6,61E+00	1,04E+00			
7,00E-01	7,25E-04	9,23E-02	6,39E+00	1,12E+00			
7,43E-01	7,41E-04	9,44E-02	6,54E+00	1,13E+00			
7,73E-01	7,86E-04	1,00E-01	6,93E+00	1,05E+00			
8,15E-01	7,84E-04	9,98E-02	6,91E+00	1,11E+00			
8,39E-01	8,07E-04	1,03E-01	7,12E+00	1,08E+00			
8,88E-01	8,22E-04	1,05E-01	7,24E+00	1,10E+00			
9,12E-01	8,77E-04	1,12E-01	7,73E+00	9,93E-01			
9,84E-01	8,75E-04	1,11E-01	7,72E+00	1,08E+00			
1,04E+0	9,29E-04	1,18E-01	8,19E+00	1,01E+00			
1,08E+0	9,22E-04	1,17E-01	8,13E+00	1,07E+00			
1,09E+0	9,72E-04	1,24E-01	8,57E+00	9,69E-01			
1,27E+0	9,90E-04	1,26E-01	8,72E+00	1,08E+00			
1,38E+0	1,05E-03	1,34E-01	9,29E+00	1,04E+00			
1,43E+0	1,12E-03	1,42E-01	9,85E+00	9,61E-01			
1,47E+0	1,09E-03	1,39E-01	9,63E+00	1,03E+00			

Obtidos os dados da velocidade média do fluido, para seu respectivo gradiente hidráulico, modelou-se o comportamento não linear ilustrado pela Figura 67a, e expresso pela equação potencial com bases em Forchheimer, com uma correlação (R^2) de 0,99. As constantes da equação expressas em $a = 21,263$ e $b = 585,99$, permitem obter o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada carga hidráulica ensaiada, como pode ser observado na Figura 67b, além dos parâmetros hidráulicos como observado na tabela supracitada.

FIGURA 67- GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A) E NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRITO (B): QIN (3)



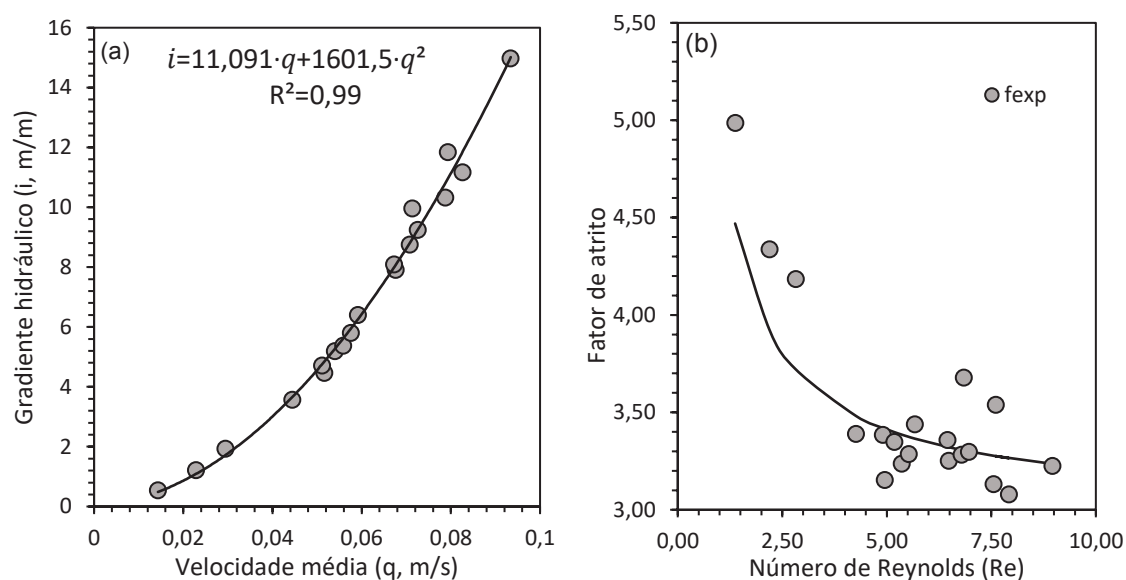
Na Tabela 33 podem ser observado os parâmetros hidráulicos (d , K e d/\sqrt{k}) para o traço QIN (4), - porosidade de 25,64% - além das características de escoamento representados através do número de Reynolds (Re) e fator de atrito.

TABELA 33 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: QIN (4)

Gradiente hidráulico (m/m)	Vazão (m³/s)	Vel (m/s)	Re	fexp	d (m)	K (m/s)	d/√k
5,43E-02	1,12E-04	1,43E-02	1,37	4,99	1,44 E-04	9,02 E-02	1,51
1,21E-01	1,80E-04	2,29E-02	2,19	4,34			
1,93E-01	2,31E-04	2,95E-02	2,83	4,18			
3,56E-01	3,49E-04	4,45E-02	4,26	3,39			
4,47E-01	4,05E-04	5,16E-02	4,95	3,15			
4,71E-01	4,02E-04	5,12E-02	4,9	3,39			
5,19E-01	4,24E-04	5,40E-02	5,18	3,35			
5,37E-01	4,39E-04	5,59E-02	5,36	3,24			
5,80E-01	4,52E-04	5,76E-02	5,52	3,29			
6,40E-01	4,65E-04	5,92E-02	5,67	3,44			
7,91E-01	5,31E-04	6,76E-02	6,48	3,25			
8,09E-01	5,29E-04	6,73E-02	6,45	3,36			
8,75E-01	5,56E-04	7,08E-02	6,79	3,28			
9,24E-01	5,70E-04	7,26E-02	6,96	3,3			
9,96E-01	5,61E-04	7,14E-02	6,84	3,68			
1,03E+00	6,18E-04	7,87E-02	7,55	3,13			
1,12E+00	6,49E-04	8,26E-02	7,92	3,08			
1,18E+00	6,23E-04	7,93E-02	7,6	3,54			
1,50E+00	7,34E-04	9,34E-02	8,96	3,23			

Obtidos os dados da velocidade média do fluido, para seu respectivo gradiente hidráulico, modelou-se o comportamento não linear ilustrado pela Figura 68a, e expresso pela equação potencial com bases em Forchheimer, com uma correlação (R^2) de 0,99. As constantes da equação expressas em $a = 11,091$ e $b = 1601,5$, permitem obter o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada carga hidráulica ensaiada, como pode ser observado na Figura 68b, além dos parâmetros hidráulicos como observado na tabela supracitada.

FIGURA 68 - GRADIENTE HIDRÁULICO E VELOCIDADE (A) E NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRIO (B): QIN(4)



APÊNDICE 3 – DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO (EXPERIMENTAL): ABORDAGEM NÃO DARCIANA

1. PARÂMETROS HIDRÁULICOS: DADOS EXPERIMENTAIS

Neste item, são apresentados os parâmetros hidráulicos dos traços produzidos laboratorialmente. Destaca-se que, em decorrência da alta porosidade conectada, nem todos CPs foram passíveis de caracterização hidráulica de seu escoamento em permeâmetro de carga constante. No entanto, a partir dos resultados obtidos, foi possível verificar os diversos aspectos da composição/produção do concreto permeável que podem influenciar no escoamento.

De modo geral, a primeira abordagem demandou a produção de traços com características semelhantes, com a compactação por haste, relação a/c constante e características físicas dos agregados com faixa uniforme, exceto para as diferentes relações P/Ag, sendo os traços CP35HU(30), CP45HU(30), CP45HU(30) e CP55HU(30). O segundo objetivo visou a produção de traços com agregados de granulometria contínua, no entanto com diferentes tipos de compactação, por haste e vibração, correspondendo aos traços CP42HC(30), CP36HC(30), CP42VC(30), CP36VC(30). O terceiro objetivo buscou verificar a influência da relação a/c nas propriedades hidráulicas, produzindo, assim, os traços CP55HU(26) e CP55HU(34).

Assim, a partir dos ensaios em permeâmetro de carga constante, são elencados os dados hidráulicos do escoamento, os parâmetros hidráulicos, número de Reynolds e o fator de atrito para cada CP de concreto permeável, realizando a mesma abordagem de caracterização descrita no Apêndice 2.

CP35HU(30)

Na Tabela 34 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico do Traço CP35HU(30), além das constantes quadráticas obtidas pela equação de Forchheimer.

TABELA 34 – DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP35HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade (%)</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	28,32	0	0,0217	0,0245	0,0276	34,77	2696,22
CP 2	27,60	0	0,0219	0,0247	0,0275	23,95	3097,14
CP 3	29,27	0	0,0258	0,0294	0,0324	19,23	2254,69
CP 4	29,04	0	0,0229	0,0270	0,0301	46,14	1766,82
CP 5	29,82	0	0,0239	0,0278	0,0303	24,98	2408,41
CP 6	27,85	0	0,0215	0,0241	0,0271	28,83	3039,1

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter os parâmetros hidráulicos d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 35.

TABELA 35 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP35HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente</i>	<i>Re</i>	<i>f_{exp}</i>
CP 1	7,7544E-05	0,02876043	1,43214663	3	1,494	4,184
				2,5	1,326	4,430
				2	1,173	4,526
CP 2	0,00012932	0,04175365	1,98217768	3	1,797	5,063
				2,5	1,611	5,248
				2	1,429	5,334
CP 3	0,00011725	0,05200208	1,61039236	3	2,361	4,074
				2,5	2,138	4,143
				2	1,878	4,296
CP 4	3,8293E-05	0,02167317	0,8146818	3	1,414	3,059
				2,5	1,267	3,172
				2	1,077	3,511
CP 5	9,6414E-05	0,04003203	1,50927615	3	1,935	4,098
				2,5	1,777	4,130
				2	1,527	4,387
CP 6	0,00010541	0,03468609	1,77278951	3	1,612	4,765
				2,5	1,435	5,005
				2	1,276	5,063

CP45HU(30)

Na Tabela 36 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP45HU(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 36 – DADOS DO ESCOAMENTO E FORCHHEIMER: TRAÇO CP45HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> <i>(i = a · q + b · q²)</i>	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	28,86%	0	0,0219	0,0249	0,0271	10,03	3686,8
CP 2	27,64%	0	0,0190	0,0218	0,0240	28,76	3987,23
CP 3	27,57%	0	0,0186	0,0212	0,0236	37,60	3775,9
CP 4	29,37%	0	0,0222	0,0248	0,0278	22,40	3108,74
CP 5	27,64%	0	0,0186	0,0209	0,0232	23,04	4593,93
CP 6	27,53%	0	0,0213	0,0241	0,0272	39,03	2630
CP 7	28,81%	0	0,0199	0,0224	0,0248	19,36	4101,9
CP 8	29,91%	0	0,0217	0,0245	0,0272	23,01	3215,6
CP 9	30,15%	0	0,0231	0,0264	0,0289	18,30	2941,1
CP 10	26,82%	0	0,0177	0,0199	0,0223	29,44	4757,2
CP 11	28,10%	0	0,0213	0,0238	0,0270	35,97	2801,1
CP 12	28,90%	0	0,0215	0,0246	0,0267	11,97	3723,3

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter os parâmetros hidráulicos d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 37.

TABELA 37- PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP45HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>f_{exp}</i>
CP 1	3,67E-04	9,97E-02	3,65E+00	3	2,73	8,07
				2,5	2,51	8,08
				2	2,20	8,27
CP 2	1,39E-04	3,48E-02	2,33E+00	3	1,43	6,07
				2,5	1,29	6,17
				2	1,13	6,44
CP 3	1,00E-04	2,66E-02	1,93E+00	3	1,23	5,48
				2,5	1,11	5,66
				2	0,97	5,93
CP 4	1,39E-04	4,46E-02	2,06E+00	3	1,87	5,15
				2,5	1,67	5,40
				2	1,50	5,41
CP 5	1,99E-04	4,34E-02	3,00E+00	3	1,54	7,27
				2,5	1,39	7,49
				2	1,23	7,58
CP 6	6,74E-05	2,56E-02	1,32E+00	3	1,39	4,05
				2,5	1,23	4,32
				2	1,09	4,43
CP 7	2,12E-04	5,16E-02	2,92E+00	3	1,80	6,95
				2,5	1,63	7,07
				2	1,44	7,22
CP 8	1,40E-04	4,35E-02	2,10E+00	3	1,81	5,29
				2,5	1,63	5,46
				2	1,44	5,56
CP 9	1,61E-04	5,46E-02	2,15E+00	3	2,16	5,26
				2,5	1,97	5,27
				2	1,72	5,50
CP 10	1,62E-04	3,40E-02	2,75E+00	3	1,31	6,99
				2,5	1,17	7,29
				2	1,04	7,34
CP 11	7,79E-05	2,78E-02	1,46E+00	3	1,44	4,29
				2,5	1,27	4,59
				2	1,13	4,62
CP 12	3,11E-04	8,35E-02	3,37E+00	3	2,47	7,60
				2,5	2,27	7,61
				2	1,99	7,82

CP55HU(30)

Na Tabela 38 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP55HU(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 38 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP55HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	20,97%	0	0,0058	0,0066	0,0074	111,25	39953,7
CP 2	19,19%	0	0,0051	0,0057	0,0064	107,76	56621,9
CP 3	23,42%	0	0,0091	0,0102	0,0114	51,71	18733,1
CP 4	20,97%	0	0,0074	0,0083	0,0093	101,71	23692,8
CP 5	22,64%	0	0,0107	0,0120	0,0133	39,44	13946,6
CP 6	19,96%	0	0,0062	0,0069	0,0077	79,70	40087,0
CP 7	19,35%	0	0,0044	0,0050	0,0055	89,44	81674,8
CP 8	23,22%	0	0,0095	0,0111	0,0125	107,33	10707,7
CP 9	21,31%	0	0,0073	0,0083	0,0094	121,17	21329,2
CP 10	20,26%	0	0,0070	0,0079	0,0089	98,79	27048,3
CP 11	18,37%	0	0,0045	0,0051	0,0056	96,96	77580,8
CP 12	21,97%	0	0,0097	0,0108	0,0122	71,22	14320,6

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter os parâmetros hidráulicos d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 39.

TABELA 39 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP55HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>fexp</i>
CP 1	3,59E-04	8,99E-03	1,19E+01	3	0,22	32,56
				2,5	0,20	34,02
				2	0,18	34,83
CP 2	5,25E-04	9,28E-03	1,71E+01	3	0,20	44,20
				2,5	0,18	45,89
				2	0,16	46,68
CP 3	3,62E-04	1,93E-02	8,16E+00	3	0,50	20,24
				2,5	0,45	20,85
				2	0,40	21,20
CP 4	2,33E-04	9,83E-03	7,36E+00	3	0,30	21,34
				2,5	0,26	22,80
				2	0,23	22,98
CP 5	3,54E-04	2,54E-02	6,96E+00	3	0,68	16,80
				2,5	0,61	17,36
				2	0,54	17,47
CP 6	5,03E-04	1,25E-02	1,41E+01	3	0,28	35,22
				2,5	0,25	36,61
				2	0,22	36,90
CP 7	9,13E-04	1,12E-02	2,70E+01	3	0,19	64,58
				2,5	0,17	66,53
				2	0,15	68,00
CP 8	9,98E-05	9,32E-03	3,24E+00	3	0,38	11,68
				2,5	0,34	12,34
				2	0,29	13,27
CP 9	1,76E-04	8,25E-03	6,07E+00	3	0,27	19,42
				2,5	0,24	20,65
				2	0,21	21,45
CP 10	2,74E-04	1,01E-02	8,52E+00	3	0,29	23,96
				2,5	0,25	25,20
				2	0,22	25,73
CP 11	8,00E-04	1,03E-02	2,47E+01	3	0,18	60,12
				2,5	0,16	62,04
				2	0,15	62,69
CP 12	2,01E-04	1,40E-02	5,31E+00	3	0,46	14,85
				2,5	0,41	15,81
				2	0,37	15,86

CP65HU(30)

Na Tabela 40 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP65HU(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 40 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP65HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> <i>(i = a · q + b · q²)</i>	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	18,96%	0	0,0069	0,0081	0,0090	127,01	23001,72
CP 2	18,59%	0	0,0068	0,0077	0,0085	65,88	33692,93
CP 3	23,07%	0	0,0116	0,0133	0,0146	45,35	10885,35
CP 4	20,07%	0	0,0070	0,0080	0,0089	113,65	24843,72
CP 5	23,80%	0	0,0098	0,0113	0,0125	69,65	13458,51
CP 6	18,25%	0	0,0067	0,0077	0,0085	88,02	30932,3
CP 7	22,77%	0	0,0104	0,0117	0,0129	30,91	15670,32
CP 8	22,29%	0	0,0098	0,0110	0,0122	36,86	17215,33
CP 9	23,44%	0	0,0107	0,0123	0,0136	62,45	11539,12
CP 10	19,59%	0	0,0073	0,0084	0,0094	107,18	22842,95
CP 11	18,46%	0	0,0071	0,0080	0,0089	85,84	28057,15
CP 12	21,82%	0	0,0105	0,0118	0,0132	58,67	12758,35

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter os parâmetros hidráulicos d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, experimental e teórico, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 41.

TABELA 41- PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP65HU(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>fexp</i>
CP 1	1,81E-04	7,87E-03	6,39E+00	3	0,25	20,70
				2,5	0,23	21,41
				2	0,20	23,04
CP 2	5,11E-04	1,52E-02	1,30E+01	3	0,33	32,05
				2,5	0,30	32,43
				2	0,27	33,62
CP 3	2,40E-04	2,21E-02	5,06E+00	3	0,69	13,10
				2,5	0,63	13,11
				2	0,55	13,89
CP 4	2,19E-04	8,80E-03	7,30E+00	3	0,27	22,01
				2,5	0,24	23,11
				2	0,21	24,05
CP 5	1,93E-04	1,44E-02	5,05E+00	3	0,48	14,33
				2,5	0,43	14,57
				2	0,38	15,51
CP 6	3,51E-04	1,14E-02	1,03E+01	3	0,29	27,52
				2,5	0,26	28,38
				2	0,23	29,31
CP 7	5,07E-04	3,24E-02	8,83E+00	3	0,74	20,33
				2,5	0,67	20,71
				2	0,60	20,97
CP 8	4,67E-04	2,71E-02	8,88E+00	3	0,64	20,81
				2,5	0,58	21,42
				2	0,52	21,51
CP 9	1,85E-04	1,60E-02	4,57E+00	3	0,55	12,78
				2,5	0,50	13,18
				2	0,43	13,76
CP 10	2,13E-04	9,33E-03	6,91E+00	3	0,29	20,75
				2,5	0,26	21,60
				2	0,23	22,68
CP 11	3,27E-04	1,16E-02	9,48E+00	3	0,31	25,46
				2,5	0,28	26,23
				2	0,24	27,18
CP 12	2,17E-04	1,70E-02	5,22E+00	3	0,55	14,02
				2,5	0,49	14,61
				2	0,44	14,93

CP55HU(26)

Na Tabela 42 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP55HU(26), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 42 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP55HU(26)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	23,17%	0	0,0121	0,0136	0,0152	41,25	10306,72
CP 2	23,20%	0	0,0121	0,0140	0,0159	86,608	6482,49
CP 3	23,00%	0	0,0110	0,0129	0,0146	103,07	7057,88

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter as constantes hidráulicas d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 43.

TABELA 43 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP55HU(26)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente</i>	<i>Re</i>	<i>f_{exp}</i>
CP 1	2,50E-04	2,42E-02	5,03E+00	3	0,76	12,66
				2,5	0,68	13,11
				2	0,60	13,30
CP 2	7,50E-05	1,15E-02	2,18E+00	3	0,54	8,04
				2,5	0,48	8,53
				2	0,42	9,16
CP 3	6,80E-05	9,70E-03	2,18E+00	3	0,46	8,72
				2,5	0,41	9,29
				2	0,35	10,11

CP55HU(34)

Na Tabela 44 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP55HU(34), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 44 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP55HU(34)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	16,74%	0	0,0059	0,0068	0,0075	125,68	36201,8
CP 2	16,06%	0	0,0040	0,0044	0,0049	38,75	117393,75
CP 3	14,45%	0	0,0040	0,0045	0,0050	19,8	117913,02

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter as constantes hidráulicas d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 45.

TABELA 45 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP55HU(34)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>fexp</i>
CP 1	2,88E-04	7,96E-03	1,01E+01	3	0,21	29,67
				2,5	0,19	30,33
				2	0,17	32,34
CP 2	3,03E-03	2,58E-02	5,91E+01	3	0,25	125,74
				2,5	0,23	127,90
				2	0,20	127,26
CP 3	5,96E-03	5,05E-02	8,30E+01	3	0,36	171,57
				2,5	0,32	172,26
				2	0,29	172,83

CP42HC(30)

Na Tabela 46 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP42HC(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 46 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP42HC(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	23,64%	0	0,0165	0,0188	0,0212	52,41	4202,5
CP 2	24,67%	0	0,0188	0,0211	0,0234	15,73	4824,06
CP 3	24,15%	0	0,0200	0,0229	0,0255	35,89	3191,34
CP 4	25,64%	0	0,0229	0,0264	0,0294	33,84	2318,92
CP 5	26,10%	0	0,0230	0,0262	0,0288	18,49	2961,5
CP 6	27,22%	0	0,0244	0,0276	0,0304	13,79	2793,92
CP 7	26,95%	0	0,0217	0,0245	0,0274	27,98	2995,34
CP 8	27,08%	0	0,0250	0,0279	0,0309	9,13	2859,31
CP 9	26,57%	0	0,0218	0,0249	0,0273	19,45	3292,88
CP 10	27,32%	0	0,0202	0,0234	0,0260	41,17	2849,5
CP 11	26,09%	0	0,0191	0,0217	0,0244	40,85	3372,27
CP 12	27,51%	0	0,0229	0,0255	0,0302	60,49	1313,3

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter as constantes hidráulicas d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 47.

TABELA 47- DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP42HC(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>fexp</i>
CP 1	8,02E-05	1,91E-02	1,82E+00	3	0,94	5,75
				2,5	0,83	6,11
				2	0,73	6,33
CP 2	3,07E-04	6,36E-02	3,81E+00	3	1,88	8,66
				2,5	1,70	8,86
				2	1,52	8,90
CP 3	8,89E-05	2,79E-02	1,67E+00	3	1,36	4,81
				2,5	1,22	4,98
				2	1,07	5,21
CP 4	6,85E-05	2,96E-02	1,25E+00	3	1,61	3,74
				2,5	1,45	3,87
				2	1,26	4,09
CP 5	1,60E-04	5,41E-02	2,16E+00	3	2,14	5,26
				2,5	1,94	5,32
				2	1,71	5,50
CP 6	2,03E-04	7,25E-02	2,36E+00	3	2,61	5,49
				2,5	2,37	5,53
				2	2,09	5,69
CP 7	1,07E-04	3,57E-02	1,77E+00	3	1,65	4,74
				2,5	1,48	4,94
				2	1,31	5,05
CP 8	3,13E-04	1,10E-01	2,96E+00	3	3,26	6,52
				2,5	2,95	6,67
				2	2,64	6,64
CP 9	1,69E-04	5,14E-02	2,34E+00	3	1,98	5,70
				2,5	1,80	5,75
				2	1,58	5,97
CP 10	6,92E-05	2,43E-02	1,39E+00	3	1,29	4,35
				2,5	1,16	4,46
				2	1,00	4,80
CP 11	8,26E-05	2,45E-02	1,65E+00	3	1,22	4,93
				2,5	1,08	5,20
				2	0,96	5,36
CP 12	2,17E-05	1,65E-02	5,29E-01	3	1,24	2,64
				2,5	1,05	3,06
				2	0,94	3,09

CP36HC(30)

Na Tabela 48 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP36HC(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 48 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP36HC(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 1	26,66%	0	0,0263	0,0298	0,0330	19,02	2174,79
CP 2	25,66%	0	0,0190	0,0217	0,0240	28,48	4017,73
CP 3	25,62%	0	0,0191	0,0216	0,0241	30,52	3899,22
CP 4	27,37%	0	0,0221	0,0252	0,0279	23,54	3011,04
CP 5	25,46%	0	0,0217	0,0248	0,0274	24,17	3106,17
CP 6	26,76%	0	0,0212	0,0243	0,0264	13,79	3739,58
CP 7	25,32%	0	0,0209	0,0237	0,0260	15,24	3828,28
CP 8	25,50%	0	0,0227	0,0252	0,0280	12,32	3396,76
CP 9	26,95%	0	0,0257	0,0289	0,0321	17,27	2374,05
CP 10	27,58%	0	0,0260	0,0293	0,0323	10,13	2565,4
CP 11	27,32%	0	0,0227	0,0253	0,0280	8,69	3531,19
CP 12	28,06%	0	0,0241	0,0280	0,0306	25,88	2324,66

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter as constantes hidráulicas d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 49.

TABELA 49 - DADOS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP36HC(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>f_{exp}</i>
CP 1	1,14E-04	5,26E-02	1,56E+00	3	2,42	3,95
				2,5	2,18	4,04
				2	1,92	4,16
CP 2	1,41E-04	3,51E-02	2,36E+00	3	1,43	6,13
				2,5	1,30	6,20
				2	1,14	6,51
CP 3	1,28E-04	3,28E-02	2,21E+00	3	1,39	5,84
				2,5	1,25	6,07
				2	1,11	6,20
CP 4	1,28E-04	4,25E-02	1,94E+00	3	1,83	4,99
				2,5	1,66	5,06
				2	1,46	5,28
CP 5	1,29E-04	4,14E-02	1,98E+00	3	1,78	5,09
				2,5	1,61	5,18
				2	1,41	5,39
CP 6	2,71E-04	7,25E-02	3,15E+00	3	2,27	7,25
				2,5	2,09	7,13
				2	1,83	7,49
CP 7	2,51E-04	6,56E-02	3,07E+00	3	2,13	7,10
				2,5	1,94	7,14
				2	1,71	7,34
CP 8	2,76E-04	8,12E-02	3,03E+00	3	2,55	6,81
				2,5	2,29	6,90
				2	2,06	6,95
CP 9	1,37E-04	5,79E-02	1,79E+00	3	2,47	4,38
				2,5	2,22	4,51
				2	1,97	4,57
CP 10	2,53E-04	9,87E-02	2,52E+00	3	3,24	5,66
				2,5	2,93	5,75
				2	2,61	5,80
CP 11	4,06E-04	1,15E-01	3,75E+00	3	3,03	8,13
				2,5	2,74	8,20
				2	2,46	8,25
CP 12	8,98E-05	3,86E-02	1,43E+00	3	1,92	3,94
				2,5	1,76	3,92
				2	1,51	4,23

CP42VC(30)

Na Tabela 50 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, - velocidade/gradiente hidráulico - através do concreto permeável para o Traço CP42VC(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 50 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP42VC(30)

Corpos de Prova	Porosidade	Velocidade (m/s)				Equação Forchheimer ($i = a \cdot q + b \cdot q^2$)	
		Gradiente hidráulico				a	b
		0	2	2,5	3		
CP 1	24,06	0	0,0173	0,0194	0,0213	5,98	6340,37
CP 2	29,03	0	0,0234	0,0258	0,0284	-	-
CP 4	27,29	0	0,0209	0,0227	0,0253	-	-
CP 5	27,15	0	0,0220	0,0245	0,0269	-	-
CP 6	27,02	0	0,0206	0,0230	0,0251	-	-
CP 7	29,27	0	0,0217	0,0238	0,0252	-	-
CP 9	28,49	0	0,0261	0,0294	0,0322	4,36	2761,05
CP 10	27,93	0	0,0229	0,0260	0,0288	20,97	2890,49
CP 11	28,20	0	0,0225	0,0254	0,0287	34,69	2446,65

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter as constantes hidráulicas d , K , e $d/\text{raiz}(k)$, e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 51.

TABELA 51 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP42VC(30)

Corpos de Prova	d (m)	K (m/s)	$d/\text{raiz}(k)$	Gradiente hidráulico	Re	f_{exp}
CP 1	1,06E-03	1,67E-01	8,12E+00	3	2,78	16,95
				2,5	2,53	17,06
				2	2,26	17,11
CP 9	6,33E-04	2,29E-01	4,14E+00	3	4,92	8,7
				2,5	4,49	8,71
				2	3,99	8,8
CP 10	1,38E-04	4,77E-02	1,98E+00	3	2,01	4,95
				2,5	1,81	5,05
				2	1,6	5,21
CP 11	7,10E-05	2,88E-02	1,30E+00	3	1,56	3,87
				2,5	1,38	4,11
				2	1,22	4,2

CP36VC(30)

Na Tabela 52 pode ser observado dados relativos ao escoamento do fluido, velocidade/gradiente hidráulico, do Traço CP36VC(30), além das constantes quadráticas da equação de Forchheimer.

TABELA 52 - DADOS DO ESCOAMENTO E EQUAÇÃO DE FORCHHEIMER: TRAÇO CP36VC(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>Porosidade</i>	<i>Velocidade (m/s)</i>				<i>Equação Forchheimer</i> $(i = a \cdot q + b \cdot q^2)$	
		<i>Gradiente hidráulico</i>				<i>a</i>	<i>b</i>
		0	2	2,5	3		
CP 2	26,51%	0	0,0216	0,0245	0,0266	3,7	4067,5
CP 4	27,10%	0	0,0262	0,0298	0,0327	15,57	2314,54
CP 10	27,51%	0	0,0265	0,0295	0,0324	-	-
CP 12	27,18%	0	0,0263	0,0300	0,0328	12,77	2386,27

A partir das constantes da equação quadrática, expressas em a e b , é possível obter as constantes hidráulicas d , K , e d/\sqrt{k} , e, assim, o número de Reynolds, Re , e o fator de atrito, $f_{\sqrt{k}}$, do escoamento para cada um dos gradientes, como pode ser observado na Tabela 53.

TABELA 53 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO ESCOAMENTO: TRAÇO CP36VC(30)

<i>Corpos de Prova</i>	<i>d (m)</i>	<i>K (m/s)</i>	<i>d/raiz(k)</i>	<i>Gradiente hidráulico</i>	<i>Re</i>	<i>f_exp</i>
CP 2	2,70E-01	2,70E-01	6,62E+00	3	4,42	13,79
				2,5	4,07	13,54
				2	3,59	13,92
CP 4	6,42E-02	6,42E-02	1,84E+00	3	2,65	4,44
				2,5	2,41	4,48
				2	2,12	4,64
CP 12	7,83E-02	7,83E-02	2,09E+00	3	2,93	4,90
				2,5	2,68	4,86
				2	2,35	5,08

Desse modo, nota-se os dados hidráulicos do escoamento de todos CPs realizados nesta pesquisa. Importante destacar que os parâmetros (d , \sqrt{k} e d/\sqrt{k}) obtidos, foram detalhadamente especificados neste Apêndice, uma vez que servem como um “banco de dados” para diferentes análises e corroboram para estudos comparativos na área da dinâmica dos fluidos para meios com macroporosidade, o que auxiliarão em projetos de dosagem do concreto permeável.

APÊNDICE 4 – PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL: ANÁLISE GERAL DOS TRAÇOS

Neste Apêndice é apresentado uma robusta campanha experimental, complementando a abordagem desenvolvida nesta tese, em específico ao Capítulo 4, de modo a verificar as características físicas do concreto permeável a partir da densidade no estado fresco e no estado endurecido, porosidade total e efetiva, e seu comportamento mecânico, através da resistência à compressão e à tração para diferentes traços, abrangendo diferentes tipos de compactação, - haste e vibração - agregados de diferentes granulometrias, - frações granulométricas contínuas e uniformes – e com variações nas relações a/c e P/Ag .

1. MATERIAIS E MÉTODOS

As composições utilizadas nesta abordagem experimental foram definidas com o intuito de emular dosagens típicas encontradas em aplicações de concreto permeável. A partir das frações granulométricas obtidas (vide Figura 27), duas composições granulométricas foram definidas como objetos de estudo, como pode ser observado na Tabela 54, sendo: por um lado, uma composição simulando uma condição granulométrica mais contínua; e, por outro lado, uma composição de diâmetro uniforme. Para as duas situações as dimensões dos agregados estão dentro do encontrado na literatura (LIAN; ZHUGE, 2010; LIM; TWAN; FWA, 2013; ZAETANG *et al.*, 2013; NGUYEN *et al.*, 2014; IBRAHIM *et al.*, 2014). Para a composição granulométrica contínua, possuem frações granulométricas variando entre 6,3 a 19 mm, e para a composição granulométrica uniforme, a fração granulométrica de 6,3 a 9,5 mm.

TABELA 54 – COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Composição granulométrica	Volume das faixas (%)		
	6,3-9,5 mm	9,5-12,5 mm	12,5-19 mm
Continua (C)	30	50	20
Uniforme (U)	100	0	0

Para composição granulométrica contínua, foi determinado que a fração granulométrica predominante (de tamanho entre 9,5 e 12,5 mm) é a da série

intermediária. Isso quer dizer que foram utilizadas frações granulométricas inferior (de tamanho entre 6,3 a 9,5 mm) e superior (de tamanho entre 12,5 e 19 mm) em sua composição. A utilização de faixas granulométricas com diâmetro inferior promove maior compactidade no conjunto granular, aumentando o desempenho mecânico, porém podem diminuir o coeficiente de permeabilidade. Em contrapartida, a utilização de agregados com maiores diâmetros promove menor compactidade no conjunto, aumentando a permeabilidade, em seu amplo sentido, no entanto diminuindo a resistência à compressão e à tração (PARK; TIA, 2004; TENNIS; LEMIN; AKERS, 2004; SCHAEFER *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2006; KEVERN *et al.*, 2008; HENDERSON; TIGHE, 2012; SRIRAVINDRARAJAH; WANG; ERVIN, 2012; ZHONG; WILLE, 2016). Nestes traços, foram utilizados Cimento Portland CP II-Z regulamentado pela ABNT NBR 16697 (2018), água potável, e optou-se pela ausência de areia natural.

A partir dos materiais selecionados, foram realizadas três abordagens experimentais, diferenciando-se nos materiais constituintes e no processo de compactação. A primeira abordagem experimental tem o objetivo de verificar a influência das diferentes composições granulométricas, sendo para faixa contínua, três traços, com a nomenclatura CP30HC(30), CP36HC(30) e CP42HC(30). E outra faixa para composição granulométrica uniforme, com a produção de cinco traços, com a estrutura da nomenclatura variando de CP25HU(30) a CP65HU(30). A nomenclatura abordada faz referência a relação Pasta/Agregado (P/Ag) utilizada em cada traço produzido (e. g. CP30 significa um traço com relação P/Ag igual a 0,30), ao tipo de compactação utilizada (H é para o uso de haste – a metodologia de compactação será abordada posteriormente), a característica da composição granulométrica (a letra C para uma composição contínua; e a letra U para uma composição uniforme), e por fim, a constante indicando a relação a/c.

A segunda abordagem experimental aborda a influência do processo de compactação no concreto permeável. Para isso, foram produzidos traços com a mesma relação P/Ag, mesma curva granulométrica e a mesma relação a/c, porém submetidos a compactação por vibração. Com o objetivo de verificar a influência do tipo de compactação na fabricação dos CPs, decidiu-se replicar três traços utilizados na primeira campanha experimental, sendo aqui designados para os traços CP30VC(30), CP36VC(30) e CP42VC(30). Para sua nomenclatura foram utilizadas a letra “V” para designar a metodologia de compactação adotada (por vibração).

A terceira abordagem experimental verificou a influência da relação a/c nas propriedades físicas do concreto permeável. Para isso, foram produzidos traços com a mesma relação P/Ag, mesma curva granulométrica e a mesma compactação, porém com diferentes relações a/c. A partir dos resultados obtidos na metodologia adaptada de Nguyen *et al.* (2014), descrita no item 3.2.1, a relação a/c ideal foi de 0,30 para a relação P/Ag de 0,55. Assim, a partir desta referência, os demais traços foram elaborados com a relação a/c variando em menores e maiores proporções, totalizando cinco diferentes relações: 0,26, 0,28, 0,30, 0,32 e 0,34, designados de CP55HU(26), CP55HU(28), CP55HU(30), CP55HU(32) e CP55HU(34), respectivamente.

Desse modo, todos os traços, em massa, produzidos nas três abordagens experimentais podem ser observados na Tabela 55, com seus respectivos consumos de materiais.

TABELA 55 – TRAÇOS DO CONCRETO PERMEÁVEL E CONSUMO DOS MATERIAIS

Traço	Relação P/Ag em massa	Consumo de brita (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)	Traço em massa		
				Cimento	Brita	a/c
CP30VC(30)	0,30	1347,78	306,02	1	4,4	0,3
CP36VC(30)	0,36	1377,80	377,25	1	3,6	0,3
CP42VC(30)	0,42	1318,08	422,67	1	3,1	0,3
CP30HC(30)	0,30	1432,10	334,66	1	4,4	0,3
CP36HC(30)	0,36	1411,05	396,73	1	3,6	0,3
CP42HC(30)	0,42	1336,98	439,28	1	3,1	0,3
CP25HU(30)	0,25	1425,49	274,01	1	5,20	0,3
CP35HU(30)	0,35	1411,77	380,39	1	3,71	0,3
CP45HU(30)	0,45	1305,91	452,26	1	2,9	0,3
CP55HU(30)	0,55	1306,85	553,35	1	2,4	0,3
CP65HU(30)	0,65	1218,81	609,40	1	2,0	0,3
CP55HU(26)	0,55	1273,58	556,13	1	2,29	0,26
CP55HU(28)	0,55	1325,45	569,94	1	2,33	0,28
CP55HU(32)	0,55	1359,11	566,30	1	2,40	0,32
CP55HU(34)	0,55	1374,29	564,22	1	2,44	0,34

Destaca-se que, inicialmente, a variação das relações P/Ag foi de 0,06 entre os traços, resultando em porosidades de baixa amplitude, sem diferenças muito expressivas que contribuam para uma análise robusta das propriedades do concreto permeável. A partir disso, os traços produzidos com faixa granulométrica uniforme, tiveram maior intervalo na relação P/Ag, de 0,1, possibilitando maiores intervalos nos resultados de porosidades.

É importante ressaltar que o consumo dos materiais, apresentados na Tabela 55, possui uma pequena diferença em relação aos mesmos traços compactados por

haste e vibração. A utilização do mesmo traço não garante necessariamente as mesmas propriedades físicas do CP de concreto permeável, uma vez há influência do processo de compactação, ainda que com tentativas de padronizar e aplicar a mesma energia, não resultada em CPs de mesma densidade, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. É evidente que as propriedades são distintas até para CPs do mesmo traço.

Para realização dos ensaios, foram produzidos/caracterizados um total de 150 CPs cilíndricos (com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) e ensaiados conforme descrição da Tabela 56.

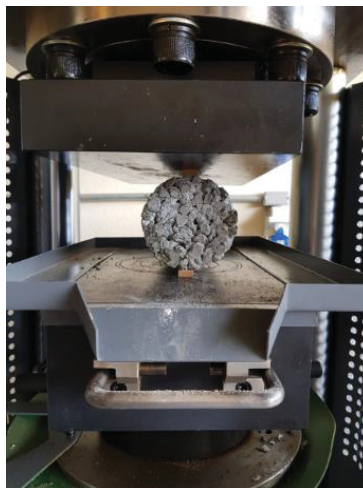
TABELA 56 – QUANTITATIVOS DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO PERMEÁVEL

Traço	Densidade (Fresco e endurecido)	Porosidade total	Porosidade Conectada	Resistência à compressão	Resistência à tração
CP25HU(30)	6	6	6	6	0
CP35HU(30)	6	6	6	6	0
CP45HU(30)	12	12	12	6	6
CP55HU(26)	6	6	6	6	6
CP55HU(28)	6	6	6	6	0
CP55HU(30)	12	12	12	6	6
CP55HU(32)	6	6	6	6	0
CP55HU(34)	6	6	6	6	6
CP65HU(30)	12	12	12	6	6
CP42HC(30)	13	13	13	7	6
CP36HC(30)	13	13	13	7	6
CP30HC(30)	13	13	13	7	6
CP42VC(30)	13	13	13	7	6
CP36VC(30)	13	13	13	7	6
CP30VC(30)	13	13	13	7	6

Destaca-se que os mesmos CPs utilizados nos ensaios mecânicos (resistência à compressão e à tração) foram, previamente, utilizados na determinação da densidade (estado fresco e endurecido), porosidade conectada e total (estado fresco e endurecido) e nas propriedades hidráulicas do escoamento, descritos no item 5.2.2. Adicionalmente ao descrito neste item, nesta abordagem experimental, do Apêndice 4, foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral conforme às recomendações da ABNT NBR 7222 (2011), trazendo a possibilidade de verificar o comportamento do meio poroso submetido a tensões de tração, característica nas solicitações de pavimentação. Na Figura 69 pode ser observado o

ensaio de resistência à tração, realizado em uma prensa mecânica com capacidade de 2000 KN, modelo YAW-2000S.

FIGURA 69 – ENSAIO DE RUPTURA À TRAÇÃO



Posteriormente a caracterização e interpretação dos resultados, nota-se que os traços poderiam ter uma quantidade de CPs reduzida. Até parece um contrassenso, uma vez que os resultados até então obtidos apresentaram alta variabilidade, mas pelo fato de que cada CP de concreto permeável ser um elemento único e com características próprias, resultante da aleatoriedade na formação do meio poroso. No entanto, como já discutido no item 5.2.3, outras conclusões foram obtidas quando se aumentou a amplitude da porosidade dos CPs produzidos, e não seu quantitativo por traço.

1.1 MÉTODOS DE PADRONIZAÇÃO DO NÍVEL DE COMPACTAÇÃO

Este item é dedicado a segunda abordagem experimental, que busca verificar a influência dos diferentes tipos de compactação. Anteriormente a produção do concreto permeável, faz-se necessário uma padronização do nível para os dois diferentes tipos de compactação: haste e vibração.

Neste sentido, definiu-se uma metodologia para garantir que os dois processos de compactação (por haste e vibração) fossem semelhantes. Esta metodologia consiste em:

1. Verificar a massa unitária, de acordo com a ABNT NBR 45 (2006), para cada fração granulométrica utilizando a haste como processo de compactação;

2. Com a mesma fração granulométrica, definir o tempo necessário em mesa vibratória, com frequência de 60 Hz, para que esta alcance valores de massa unitária semelhantes aos encontrados no passo (1).

Pode ser observado na Tabela 57 as características físicas de três frações granulométricas considerando o agregado compactado com haste, onde são descritas: massa unitária, índice de vazios e a densidade experimental. Vale destacar que o ensaio foi realizado três vezes para cada fração granulométrica, apresentando seu respectivo desvio padrão.

TABELA 57 – MASSAS UNITÁRIAS DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO COM HASTE

Propriedades	Classes granulométricas (mm)		
	6,3-9,5	9,5-12,5	12,5-19
Massa unitária (kg/m ³) (Desvio padrão)	1.516,54 (4,14)	1.581,07 (0,85)	1.612,00 (4,5)
Índice de vazios	0,497	0,475	0,465
Densidade experimental	0,503	0,525	0,535

Para o processo de compactação com mesa vibratória, as amostras foram submetidas a diferentes tempos de exposição, variando a cada um segundo. Para as três frações granulométricas, o tempo de exposição de 5 segundos foi o que mais aproximou as massas unitárias entre os dois tipos de compactação.

Na Tabela 58 podem ser observados as características físicas para cada fração granulométrica após a compactação de 5 s em mesa vibratória.

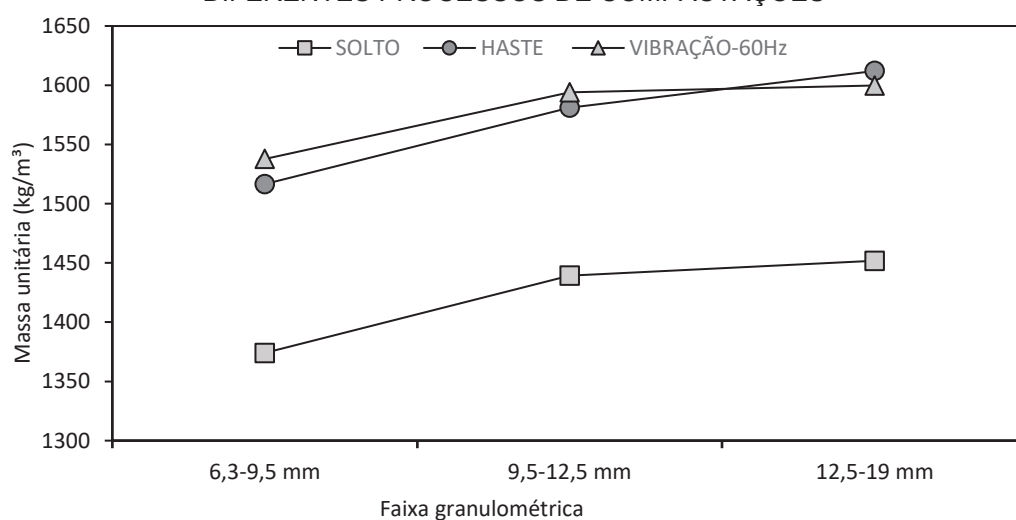
TABELA 58 – MASSAS UNITÁRIAS UTILIZANDO O PROCESSO DE COMPACTAÇÃO COM MESA VIBRATÓRIA DURANTE 5 SEGUNDOS

Propriedades	Classes granulométricas (mm)		
	6,3-9,5	9,5-12,5	12,5-19
Massa unitária (kg/m ³) (Desvio padrão)	1.537,72 (1,26)	1.593,95 (1,04)	1.599,77 (2,3)
Índice de vazios	0,489	0,470	0,468
Densidade experimental	0,512	0,530	0,532

Para melhor representar os resultados obtidos neste estudo, pode ser observado na Figura 70 a massa unitária de cada uma das frações granulométricas

submetidas aos dois processos: haste e vibração. Destaca-se, pela sobreposição dos pontos, que os diferentes tipos de compactação atingiram níveis semelhantes, em função da metodologia empregada. A título de comparação, nesta figura também são apresentados os valores de massa unitárias de cada fração granulométrica obtidos sem que as amostras fossem submetidas a qualquer nível de compactação (aqui chamado de estado solto).

FIGURA 70 – MASSA UNITÁRIA DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS SUBMETIDAS A DIFERENTES PROCESSOS DE COMPACTAÇÕES



2. RESULTADOS E ANÁLISE

Na Tabela 59 podem ser observados um quadro resumo das principais propriedades do concreto permeável dos traços produzidos neste estudo, retratando os resultados da porosidade total e conectada, densidade no estado fresco e endurecido, e resistência à compressão e à tração.

TABELA 59 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL: QUADRO RESUMO

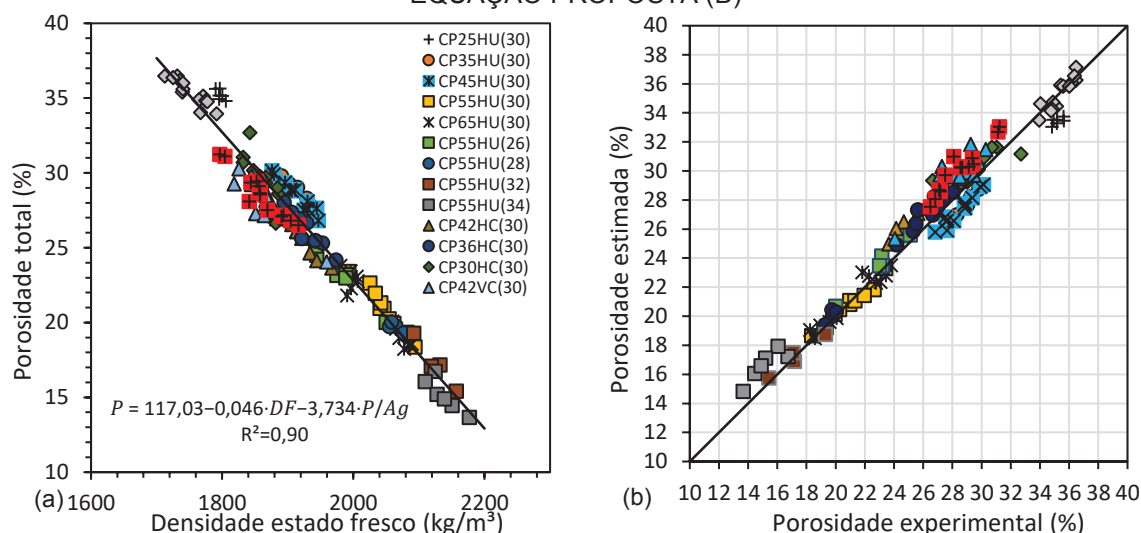
Traço	Porosidade (%) (σ)		Densidade no est. fresco (kg/m^3) (σ)	Densidade est. endurecido (kg/m^3) (σ)	Resistência à compressão (MPa) (σ)	Resistência à tração (MPa) (σ)
	Total	Conectada				
CP30HC(30)	29,71 (1,39)	26,58 (0,71)	1859,62 (17,89)	1867,16 (17,06)	4,56 (0,88)	1,07 (0,26)
CP36HC(30)	26,34 (1,13)	23,48 (1,01)	1922,30 (25,11)	1922,30 (25,11)	6,01 (1,49)	1,41 (0,28)
CP42HC(30)	26,32 (1,52)	23,06 (1,33)	1904,86 (32,58)	1904,86 (32,58)	5,89 (1,06)	1,22 (0,23)
CP30VC(30)	35,40 (0,88)	29,99 (1,52)	1751,68 (23,94)	1745,61 (22,65)	3,91 (1,20)	0,71 (0,14)
CP36VC(30)	28,52 (1,53)	24,27 (1,78)	1860,30 (35,53)	1868,23 (35,01)	6,34 (1,34)	1,34 (0,28)
CP42VC(30)	28,19 (1,61)	23,51 (1,48)	1865,59 (34,46)	1867,55 (35,04)	5,30 (1,10)	1,29 (0,17)
CP25HU(30)	35,23 (0,34)	28,66 (0,50)	1797,2 (5,20)	1781,71 (5,95)	2,17 (0,16)	2,17 (0,16)
CP35HU(30)	28,65 (0,86)	22,64 (0,92)	1917,17 (18,32)	1917,17 (18,32)	7,45 (1,02)	*
CP45HU(30)	28,44 (1,05)	24,58 (0,91)	1914,85 (23,48)	1914,85 (23,48)	7,77 (0,46)	1,49 (0,20)
CP55HU(26)	23,17 (1,76)	17,20 (1,44)	1981,59 (39,26)	1974,31 (39,39)	10,05 (1,48)	*
CP55HU(28)	19,72 (0,30)	13,72 (0,52)	2063,78 (9,69)	2054,98 (8,49)	10,56 (0,77)	*
CP55HU(30)	20,97 (1,62)	16,89 (1,20)	2046,04 (32,80)	2026,20 (32,41)	10,65 (1,07)	2,36 (0,34)
CP55HU(32)	17,25 (1,58)	10,95 (0,23)	2125,1 (27,15)	2095,3 (27,50)	13,18 (1,24)	*
CP55HU(34)	15,17 (1,10)	10,55 (1,26)	2138,19 (23,54)	2119,07 (20,15)	19,20 (1,80)	*
CP65HU(30)	20,93 (2,14)	17,93 (1,91)	2035,27 (42,38)	2004,08 (42,21)	13,01 (2,74)	2,33 (0,41)

*Não foi realizado.

2.1 POROSIDADE E DENSIDADE DO CONCRETO PERMEÁVEL

Na Figura 71a pode ser observado a relação entre a porosidade total e a densidade no estado fresco. A densidade no estado fresco está diretamente relacionada com a intensidade de compactação necessária para confecção do concreto permeável após seu lançamento, característica importante para o controle de suas propriedades, como a porosidade. A validação da equação proposta pode ser observada na Figura 71b. Nota-se através da linha de tendência traçada em cada gráfico ($x=y$) a concordância entre os resultados experimentais e estimados, indicando que o modelo proposto é aplicável com boa correlação ($R^2= 0,96$).

FIGURA 71 – POROSIDADE TOTAL E DENSIDADE NO ESTADO FRESCO (A) E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO PROPOSTA (B)



Através do critério AIC para inclusão/exclusão, utilizado pelo Método de *Stepwise*, as variáveis significativas foram selecionadas e submetidas a uma análise de resíduos para verificar se as suposições do modelo foram atendidas, como normalidade e variância constante, como pode ser observado na Tabela 60.

TABELA 60 - MÉTODO STEPWISE: POROSIDADE TOTAL

Parâmetros	Estimado	DP	p-valor
β_0	117,030	2,508	<0,01
β_1	-0,046	0,001	<0,01
β_2	-3,734	1,485	<0,01
$P = \beta_0 + \beta_1 \cdot DF + \beta_2 \cdot P/Ag$			

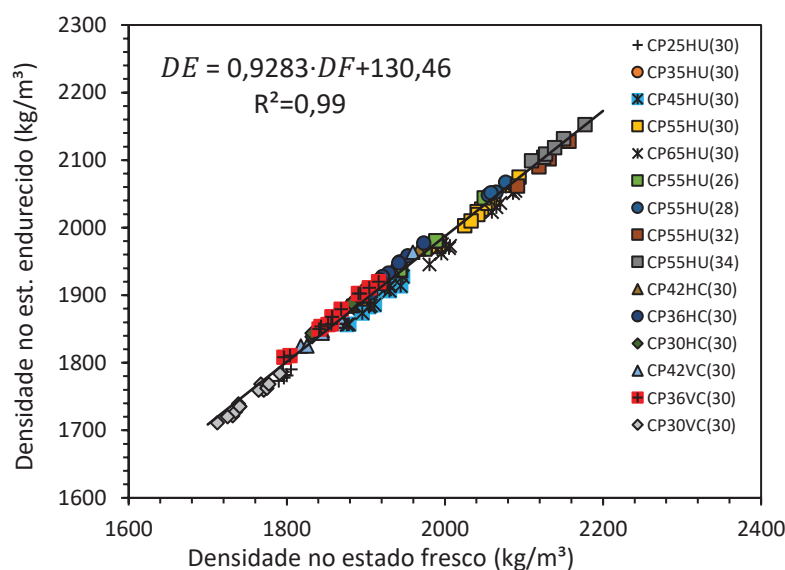
Destaca-se que, dentre os resultados obtidos, a relação a/c apresentou-se como exclusão na análise estatística, não apresentando significância na determinação da porosidade neste estudo, sendo que a densidade já é uma característica intrinsicamente relacionada a composição do concreto permeável e, também, que as amostras com diferentes relações a/c foram minoritárias ao conjunto de traços analisados. Observa-se na tabela que as variáveis DF e P/Ag foram significativas ao nível de 5% para modelar a porosidade total. Embora a relação P/Ag também esteja intrinsecamente relacionada a capacidade de adensamento da mistura, o volume de pasta ainda atua diretamente no controle da porosidade, aumentando/diminuindo os

vazios da mistura, sendo, assim, com efeito simultâneo nas duas propriedades físicas do concreto permeável: densidade e porosidade total.

Nota-se que a variação na porosidade do concreto permeável de 12 a 35% diminuiu a densidade em, aproximadamente, 500 kg/m³, de 2200 a 1700 kg/m³, respectivamente. Destaca-se que esta relação se aproxima dos dados obtidos por Yahia e Kabagire (2014) e Chandrappa e Biligiri (2016a). Embora a relação a/c não tenha significância neste conjunto de dados, uma vez que sua inclusão como variável apenas levaria a multicolinearidade, mas separadamente analisadas, observa-se graficamente a tendência de aumento da densidade quando as relações a/c passaram de 0,26 para 0,34, o que auxiliou na maior capacidade de adensamento da mistura.

Na Figura 72 pode ser observada a relação da densidade no estado fresco e densidade no estado endurecido.

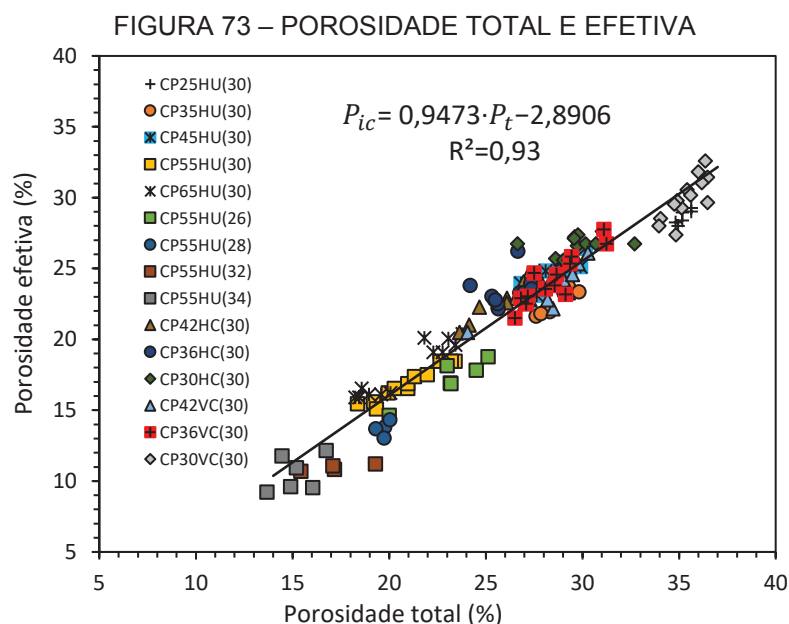
FIGURA 72 – DENSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO E FRESCO



Nota-se que a densidade no estado endurecido é sempre inferior a densidade no estado fresco, uma vez que no processo de formação do concreto ocorrem reações exotérmicas de hidratação e evaporação da água, desencadeando uma maior retração plástica quando comparada ao concreto convencional, potencializada pela alta superfície específica. Esta relação reforça, além de outros aspectos, a importância de um efetivo procedimento de cura para o concreto permeável, onde sua alta superfície específica, e baixa relação a/c, contribuem para maiores taxas de evaporação prematura e consequente retração plástica (KEVERN; SCHAEFER;

WANG, 2009).

Na Figura 73 pode ser observada a relação entre a porosidade total e a porosidade efetiva do concreto permeável. Embora a determinação da porosidade efetiva ainda não seja segura metodologicamente, esta correlação auxilia na caracterização física do material, levando em consideração a heterogeneidade do meio poroso.



Nota-se que a porosidade efetiva é sempre inferior a porosidade total, devido a existência de poros no concreto que permanecem isolados e incomunicáveis, correspondendo em média a 4%, com desvio padrão de 0,49. Ainda, destaca-se que a formação dos poros conectados tem relação direta com a porcentagem da porosidade total. Para os traços com maior correlação das variáveis estudadas, apenas variando a relação P/Ag (0,25, 0,35, 0,45, 0,55, 0,65), observa-se que os CPs com maiores vazios resultaram em maiores diferenças entre a porosidade total e conectada.

Os dados apresentados se opõem ao analisado computacionalmente por Zhang *et al.* (2018), que obtiveram menores diferenças para as maiores porosidades. No entanto, para metodologia experimental não normatizada, proposta por Neithlath (2006), mas recomendada pela ACI 522R-10 (2010), e utilizada por outros autores (DEO; SUMANASOORIYA; NEITHALATH, 2010; KUO; LIU; SU, 2013; SANDOVAL *et al.*, 2017; ONG; JAGADEESH; SU, 2020) é inegável o subdimensionamento da porosidade efetiva, o que acaba por majorar os poros isolados. Uma possível

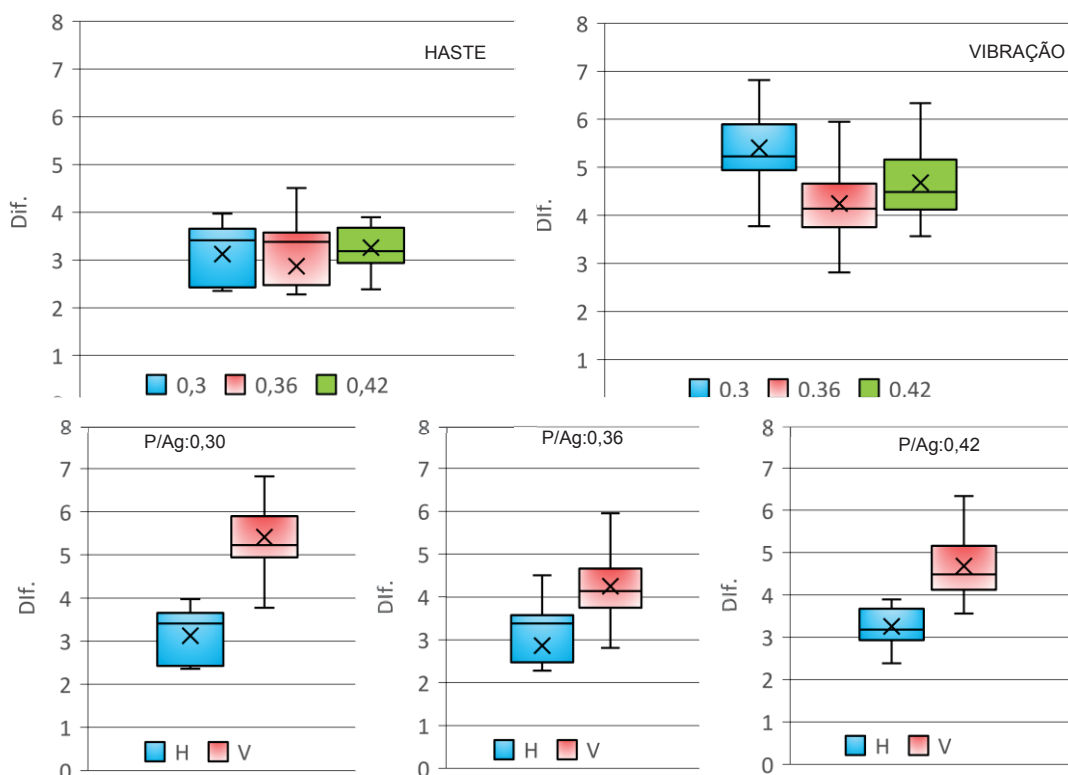
explicação seria pelo efeito dos poros na superfície lateral do CP, que podem estar em confinamento pelo contato da envoltória. Esses poros superficiais são de difícil determinação. Devido a definição variável da porosidade efetiva, a porosidade total, normalizada, torna-se um parâmetro mais seguro e utilizado.

Essa correlação possibilita atribuir significado físico para a conformação do meio poroso, retratando que o processo de formação dos poros é aleatório e resultante de um acidente único. A porosidade total é uma variável preferível na caracterização do escoamento, mas que efetivamente não influencia na capacidade permeável do meio poroso, sendo esta capacidade atribuída não apenas aos poros efetivos e intercomunicáveis, mas da sua interação com o fluido. Estes aspectos não podem ser vistos de modo desassociado. Assim, ressalta-se que embora as correlações sejam estabelecidas entre P_t e P_e , a capacidade permeável do material é um consórcio entre o fluido e o meio poroso heterogêneo. Destaca-se, por exemplo, que nem todos os condutos interconectados participam do processo de escoamento, podendo haver alguns canais preferenciais. Desse modo, este estudo exige cautela e boa interpretação dos parâmetros hidráulicos extraídos da área da dinâmica dos fluidos, para assim caracterizar o escoamento.

7.3.1 Influência do tipo de compactação nas propriedades do concreto permeável

Na Figura 74 pode ser observado, através dos *boxplots*, as diferenças entre porosidade total e efetiva, $dif = P_t - P_e$, para cada tipo de compactação em função das diferentes relações P/Ag, - 0,30, 0,36 e 0,42.

FIGURA 74- DIFERENÇA ENTRE POROSIDADE TOTAL E EFETIVA: MÉTODO DE COMPACTAÇÃO POR HASTE E VIBRAÇÃO



Graficamente pode-se aferir que o tipo de compactação interfere na distância entre P_t e P_e , o qual pelo método de vibração (V) a diferença entre a porosidade total e efetiva fica maior do que quando comparado com o método de compactação com haste (H).

Realizando a análise de variância (ANOVA) para a comparação das diferenças médias, considerando cada relação P/Ag, assim como cada tipo de compactação um tratamento, obtém-se que a diferença média entre o tipo de compactação H e V são estatisticamente diferentes, com $p\text{-valor} \leq 0,05$, independentemente do nível de P/Ag que foi considerado. As diferenças médias, entre o tipo de compactação, podem ser observadas na Tabela 61.

TABELA 61- DIFERENÇA MÉDIA DA POROSIDADE TOTAL E EFETIVA: TIPOS DE COMPACTAÇÃO

P/Ag	Diferença média entre P_t e P_e	
	Vibração	Haste
0,30	5,40	3,12
0,36	4,24	2,86
0,42	4,68	3,26

Destaca-se que as maiores diferenças na compactação por vibração estão relacionadas com a própria natureza do concreto permeável, sensível a pequenas alterações no seu processo de produção. Quanto maior o controle do processo, como pode ser verificado pela haste, menor o desvio padrão dos resultados. Nota-se que a maior diferença entre as porosidades, P_t e P_e , na compactação por vibração é resultante dos maiores vazios superficiais, como pode ser observado na Figura 75. Comportamento menos marcante no concreto permeável compactado por haste. E, independentemente do tipo de compactação, os vazios superficiais foram maiores para as menores relações P/Ag.

FIGURA 75 – ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DO CONCRETO PERMEÁVEL: COMPACTAÇÃO POR VIBRAÇÃO



2.2 Resistência à Compressão e à Tração

Para a correlação entre os resultados de porosidade e resistência à compressão foi aplicado a equação proposta por Lian *et al.* (2011). Lian *et al.* (2011)

propuseram uma equação que correlaciona uma resistência fictícia do concreto sem poros – caso os materiais ocupassem 100% do espaço – (σ_0) e a porosidade real (P) do CP com a resistência à compressão real (σ_C), como apresentado na Equação 57. No entanto, como os próprios autores destacaram, o valor de σ_0 é de difícil obtenção experimental. Desta maneira, Lian *et al.* (2011) propuseram a utilização de dois coeficientes de ajuste (A e B).

$$\sigma_C = \sigma_0 \cdot e^{-B \cdot P} = A \cdot e^{-B \cdot P} \quad (57)$$

Onde:

σ_C = resistência do concreto com porosidade (MPa);

$\sigma_0 = A$ = resistência do concreto sem poros-constante;

P = porosidade (%);

B = contante que representa a inclinação da curva $\sigma_C \times P$.

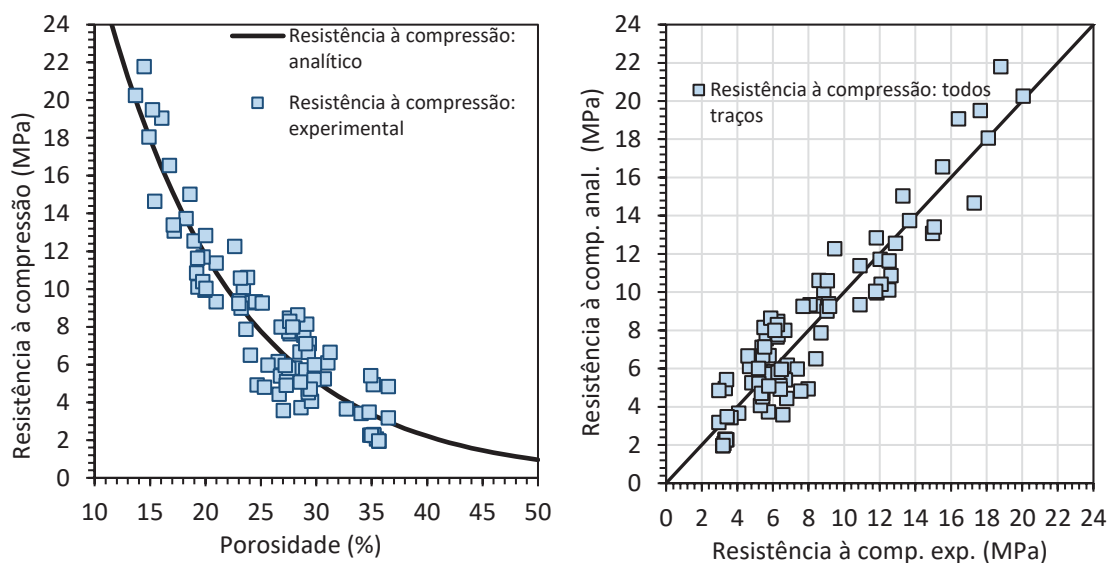
A partir dos dados experimentais obtidos nas campanhas realizadas e utilizando a equação proposta por Lian *et al.* (2011), foram obtidas as constantes A e B utilizando o método de *stepwise*, os valores podem ser observados na Tabela 62.

TABELA 62 - EQUAÇÃO DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Modelo proposto por Lian <i>et al.</i> (2011)	Coeficiente de ajuste (A)	Coeficiente de ajuste (B)
$\sigma_C = A \cdot e^{-B \cdot P}$	63,07	0,0838
DP	4,620	0,003
p-valor	<0,001	<0,001

Na Figura 76a pode ser observado os dados experimentais da resistência à compressão, em função da porosidade, sobrepondo a curva obtida pela equação proposta por Lian *et al.* (2011). De certo modo, este gráfico complementa a abordagem já realizada no subitem 4.2 e 4.3, com semelhante comportamento para a generalidade dos traços. A validação do modelo proposto pode ser observada na Figura 76b. Nota-se através da linha de tendência traçada no gráfico ($x=y$) a concordância entre os resultados experimentais e analíticos, com uma correlação de 0,88.

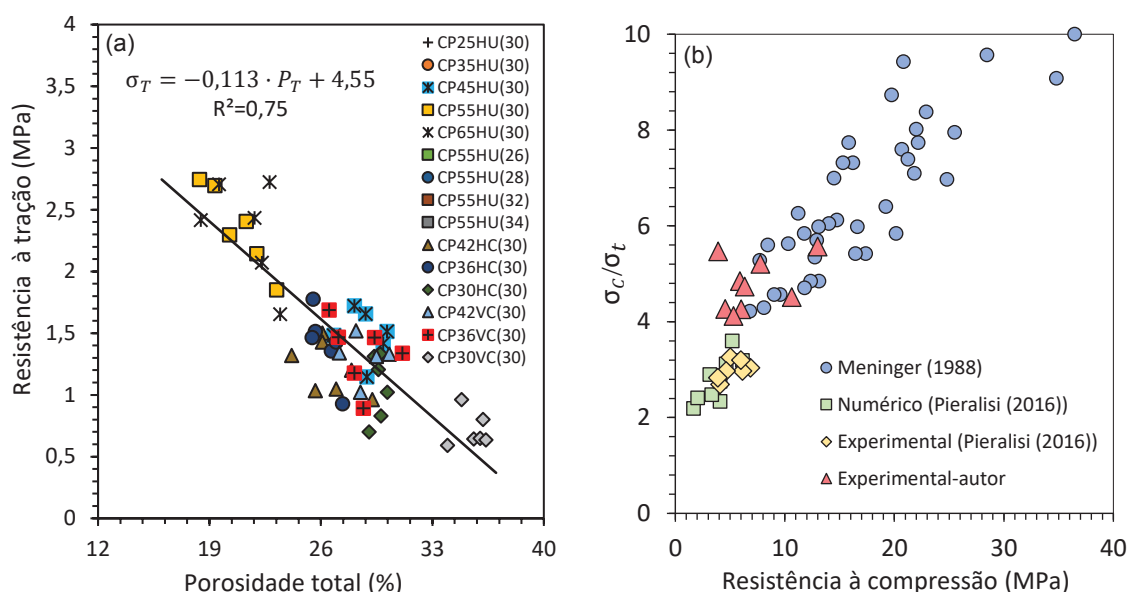
FIGURA 76 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE (A) E VALIDAÇÃO DA RESISTÊNCIA EXPERIMENTAL E ANALÍTICA (B)



Como era de se esperar, à medida que a porosidade aumenta, ocorre uma diminuição da superfície de contato para transmissão dos esforços, com consequente redução da resistência à compressão. No entanto, nota-se pela linha de tendência que, em altas porosidades, esse efeito tende a ser atenuado, com menores perdas na resistência à compressão. Destaca-se semelhante comportamento verificado por Neithalath e Deo (2011), para porosidade total de até 30%, o aumento no volume de poros em cerca de 10% resulta numa redução da resistência à compressão de aproximadamente 50%. Normalmente, em faixas superiores a 30%, a aplicação do material fica restrita devido à baixa resistência à compressão, como verifica-se neste estudo valores inferiores a 5MPa.

Na Figura 77a pode ser observado a relação entre a resistência à tração e porosidade total, com sua respectiva equação e coeficiente de correlação, e na Figura 77b a relação entre σ_c/σ_t e resistência à compressão de todos os traços produzidos.

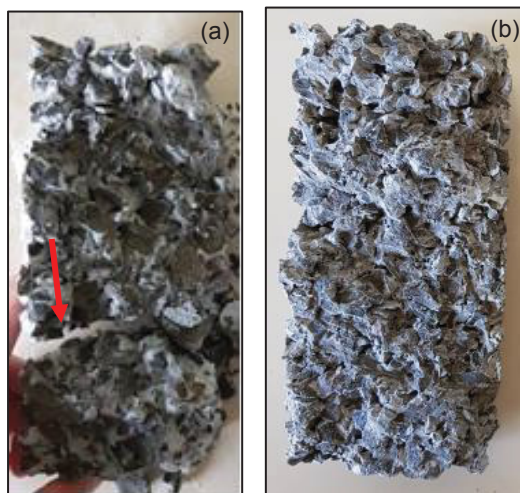
FIGURA 77 – RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E POROSIDADE TOTAL (A) E
RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO (B)



Nota-se que a relação entre σ_c/σ_t aumenta conforme maior a resistência à compressão, não sendo uma constante. Comportamento com a mesma tendência obtida por Meninger (1988) e Pieralisi (2016).

Na Figura 78 pode ser observado as superfícies de fratura dos CPs quando submetidos a resistência à tração. Em específico, na Figura 78a pode ser observado o CP com relação P/Ag de 0,36, resultando em uma seção fraturada na longitudinal e com destacamento do fundo da seção transversal. Em relação aos traços produzidos com relações P/Ag superiores, neste caso de 0,65, com conseqüente menor porosidade, observa-se seção fraturada predominantemente na longitudinal e sem destacamento do fundo na seção transversal, como retrata a Figura 78b.

FIGURA 78 – SEÇÃO FRATURADA PELO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO: (A) CP36HC(30)
E (B) CP65HC(30)



Destaca-se que a alta porosidade não influencia apenas na menor resistência à tração, mas nas diferentes superfícies de ruptura, situação considerável para uma pavimentação de tráfego de pedestres, por exemplo, o que pode acelerar a sua deterioração.